



# **Lebenszyklusanalyse von Baukonstruktionen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten**

Ein Beitrag zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Gebäuden  
bei ungewissem Lebensweg

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

DISSERTATION

von

**Dipl.-Ing. Carolin Roth**

aus  
Böblingen

**D 17**

**Darmstadt 2011**

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lützkendorf
Tag der Einreichung:	20. April 2011
Tag der mündlichen Prüfung:	07. Oktober 2011

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau  
Petersenstrasse 12  
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.to>

Roth, Carolin:

Lebenszyklusanalyse von Baukonstruktionen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten  
Ein Beitrag zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Gebäuden bei ungewissem Lebensweg

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 25

ISBN 978-3-9811881-8-9

Dr.-Ing. Carolin Roth (geb. Hock)

Geboren 1979 in Böblingen. Von 1999 bis 2005 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 2005 bis 2010 wissenschaftliche Mitarbeiterin bei Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Ab Juni 2010 tätig im Tragwerksplanungsbüro Hock Beratende Ingenieure GmbH in Haibach. Seit 2011 geschäftsführende Gesellschafterin.

## **VORWORT**

Die vorliegende Arbeit entstammt aus meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich herzlich für die Möglichkeiten, die er mir im Rahmen meiner Forschung am Fachgebiet eröffnet hat, sowie für seine Unterstützung meiner Promotion.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lützkendorf danke ich als Korreferenten für die kritische Auseinandersetzung mit meiner Arbeit.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet danke ich für die schönen Jahre, die ich dort erlebt habe und die Freundschaften, die dort geschlossen wurden. Meine Zeit in Darmstadt bleibt mir in beruflicher wie in privater Hinsicht in lieber Erinnerung.

Für ihr Interesse an meiner Forschungsarbeit, die fachlichen Diskussionen und die kritische Durchsicht der Dissertationsschrift danke ich insbesondere Dr.-Ing. Carmen Schneider und Dipl.-Wirt.-Ing. Torsten Mielecke.

Meinem Mann danke ich dafür, dass es uns gelungen ist, Beruf und Familie zu vereinbaren, auch in anstrengenden Phasen, zu denen man die Fertigstellung einer Dissertation sicherlich zählen darf.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern. Ihr habt großen Anteil am erfolgreichen Abschluss meiner Promotion, denn Zuversicht, Selbstvertrauen und Motivation wurden mir durch euch mit auf den Weg gegeben. Ich wünsche mir, dass ich den Rückhalt und die Unterstützung, die ich noch heute erlebe, an meine Kinder weitergeben kann.

Haibach, Oktober 2011

Carolin Roth

## ZUSAMMENFASSUNG

Für Bauherren und Investoren ist es in zunehmendem Maße von Interesse, welchen Beitrag ein Bauwerk zu einer Nachhaltigen Entwicklung leisten kann. Die Frage, wie dieser Beitrag *prospektiv* (d.h. vorausschauend) und *relativ* (d.h. im Vergleich von alternativen Baukonstruktionen) quantifiziert werden kann, beschäftigt bereits seit längerem die Bauforschung. Es ist allgemein anerkannt, dass die Nachhaltigkeitsanalyse von Gebäuden stets eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus erfordert. Merkmal der prospektiven Beurteilung jedoch ist, dass der künftige Lebensweg des Bauwerks unbekannt ist und die ihn bestimmenden Parameter durch Ungewissheit gekennzeichnet sind. Insbesondere Ökobilanz (Life Cycle Analysis, LCA) und Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing, LCC) fußen auf zahlreichen unsicheren Annahmen.

Zur Vorteilhaftigkeit einer Planungsvariante sind insbesondere dann keine verlässlichen Aussagen möglich, wenn ein heutiger Mehraufwand die Chance auf zukünftige Einsparungen eröffnet. Dies gilt sowohl für die Kosten als auch für Umweltgesichtspunkte. Typische Fragestellungen betreffen beispielsweise die Instandsetzungsfreundlichkeit, Umnutzungsfähigkeit oder Reinigungsfreundlichkeit eines Gebäudes.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, die eine Lebenszyklusanalyse von Gebäuden unter Ungewissheit ermöglicht. Sie beruht im Kern auf der Nutzwertanalyse und der Szenariotechnik und ist dank diverser Anpassungsmöglichkeiten für den Bewertenden flexibel auf viele Aufgabenstellungen anwendbar.

## ABSTRACT

Life Cycle Analysis and Life Cycle Costing of Building Construction – Sustainability Assessment of Buildings in the light of Uncertainty

Building owners and investors are showing a growing interest in the sustainability impact of their building – the application of sustainability assessments and ratings is growing. Existing assessment schemes quantify building sustainability in a forward-looking, comparative way.

It is commonly recognized that the sustainability assessment of buildings must comprise the entire life cycle. The parameters that are needed in order to perform the (environmental) Life Cycle Analysis (LCA) and the economic Life Cycle Costing (LCC) are often uncertain. By reason of the unknown future life cycle, LCA and LCC are based on estimates or assumptions. When choosing among design alternatives at an early planning stage, a sound decision therefore often is difficult.

This is especially relevant, when design options require additional initial investments that are linked with possible future savings, both in costs and environmental burdens. Adaptable buildings, appropriate refurbishment strategies or easy to clean constructions are typical examples for this type of problem.

This paper presents the framework for Life Cycle Analysis and Life Cycle Costing of building constructions in consideration of the uncertainty of the building life cycle. It is based on a weighted-sum multi-attribute decision method and scenario-based design. The method is applicable to many decision problems, where the best design option for a building construction is sought.

# INHALT

<b>Abbildungen und Tabellen.....</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen .....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung .....	2
1.3 Vorgehensweise .....	2
<b>2 Ausgangssituation .....</b>	<b>5</b>
2.1 Einführung.....	5
2.2 Nachhaltiges Bauen.....	5
2.2.1 Politische Ziele.....	5
2.2.2 Operationalisierung eines Leitbilds .....	8
2.3 Nachhaltigkeitsanalyse.....	10
2.3.1 Anwendungsgebiete .....	10
2.3.2 Top-down-Ansatz.....	10
2.3.3 Bottom-up-Ansatz .....	11
2.3.4 Aktueller Stand der Nachhaltigkeitsanalyse für Gebäude .....	12
2.4 Bewertungskriterien .....	14
2.4.1 Vielfalt und Eignung der Kriterien .....	14
2.4.2 Quantifizierung der Kriterien.....	15
2.4.3 Kriterien der Ökobilanzierung .....	16
2.4.3.1 Bedeutung.....	16
2.4.3.2 Indikatoren .....	18
2.4.4 Kriterium Lebenszykluskosten .....	20
2.4.4.1 Bedeutung.....	20
2.4.4.2 Kapitalwert als Indikator .....	21
2.4.4.3 Annuität als Indikator.....	22
2.5 Kritische Analyse der Nachhaltigkeitsbewertung für Gebäude .....	24
2.6 Zusammenfassung.....	27
<b>3 Grundlagen der Entscheidungstheorie .....</b>	<b>29</b>
3.1 Einführung.....	29
3.2 Nachhaltigkeitsbewertung als Entscheidungsproblem.....	29
3.3 Entscheidungsverfahren für Multikriterienprobleme.....	31
3.3.1 Überblick.....	31
3.3.2 Voruntersuchungen .....	34
3.3.3 Allgemeines Verfahren nach der multi-attributiven Nutzentheorie.....	35
3.3.4 Nutzwertanalyse.....	36

3.3.5	Analytisch-hierarchischer Prozess .....	38
3.3.6	TOPSIS-Methode .....	40
3.3.7	Kosten-Nutzen-Analyse .....	41
3.3.8	Kosten-Wirksamkeits-Analyse .....	42
3.3.9	Preis-Leistungsmodell .....	42
3.4	Entscheidungen unter Ungewissheit und unter Unsicherheit.....	43
3.4.1	Überblick .....	43
3.4.2	Sensitivitätsanalyse .....	45
3.4.3	Szenariotechnik .....	46
3.4.4	Entscheidungsregeln bei Ungewissheit.....	49
3.4.5	Entscheidungsregeln bei Unsicherheit (bei Risiko) .....	52
3.5	Diskussion weiterer Lösungsansätze.....	54
3.5.1	Konzept der Realoptionen.....	54
3.5.2	Fuzzy-Logik-Ansätze .....	55
3.6	Zusammenfassung .....	57
<b>4</b>	<b>Entwicklung einer Methodik zur Lebenszyklusanalyse unter Ungewissheit .....</b>	<b>59</b>
4.1	Einführung.....	59
4.2	Zielsetzung .....	59
4.2.1	Aufgabenstellung .....	59
4.2.2	Anwendungsbereich .....	60
4.3	Lösungsansatz .....	60
4.4	Kardinales Analyseverfahren .....	61
4.4.1	Aufbau und Elemente des Verfahrens.....	61
4.4.2	Kriterienauswahl .....	62
4.4.2.1	Nachhaltigkeitsziele .....	62
4.4.2.2	Wirkungen von Emissionen .....	63
4.4.2.3	Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen.....	64
4.4.2.4	Nutzung erneuerbarer Ressourcen.....	66
4.4.2.5	Generationenübergreifendes Wirtschaften .....	67
4.4.2.6	Gesundheit.....	68
4.4.2.7	Risikovorsorge.....	70
4.4.2.8	Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit .....	71
4.4.2.9	Grundbedürfnisse .....	72
4.4.2.10	Kulturelle und soziale Ressourcen .....	73
4.4.3	Kriterienkatalog.....	74
4.4.4	Multikriterienbewertung .....	78
4.4.4.1	Verfahren.....	78
4.4.4.2	Transformation in einen Nutzwert .....	78

4.4.4.3	Gewichtungsfaktoren .....	80
4.5	Verfahren zur Lebenszyklus-Szenarienbewertung .....	81
4.5.1	Aufbau und Elemente des Verfahrens .....	81
4.5.2	Varianten .....	81
4.5.3	Szenarien .....	82
4.5.4	Analyse der Entscheidungsmatrix .....	83
4.6	Modellbildung .....	86
4.6.1	Bedeutung .....	86
4.6.2	Gebäudemodell .....	86
4.6.3	Lebenszyklusmodell .....	88
4.6.3.1	Definition des Lebenszyklus .....	88
4.6.3.2	Herstellung .....	91
4.6.3.3	Betrieb .....	91
4.6.3.4	Instandsetzung .....	91
4.6.3.5	Änderung .....	94
4.6.3.6	Beseitigung .....	95
4.6.4	Funktionelle Einheit, Bezugsgrößen und Betrachtungsrahmen .....	95
4.7	Bewertungsablauf .....	98
4.8	Zusammenfassung .....	100
<b>5</b>	<b>Anwendungsfelder .....</b>	<b>101</b>
5.1	Einführung .....	101
5.2	Reinigungsfreundlichkeit .....	101
5.3	Instandhaltungsstrategie .....	102
5.4	Nutzerkomfort .....	103
5.5	Instandsetzungsfreundlichkeit .....	104
5.6	Umnutzungsfähigkeit .....	106
5.7	Recyclinggerechtes Bauen .....	107
5.8	Zusammenfassung .....	108
<b>6</b>	<b>Anwendung der entwickelten Methodik an einem Beispielgebäude .....</b>	<b>109</b>
6.1	Einführung .....	109
6.2	Problembeschreibung und Zielfestlegung .....	109
6.3	Variantendefinition .....	110
6.4	Einflussanalyse .....	115
6.5	Adaption der Multikriterienbewertung .....	118
6.6	Ausarbeiten der Szenarien .....	121
6.6.1	Umfeldanalyse .....	121
6.6.2	Deskriptoren .....	128
6.6.3	Szenarien .....	129
6.7	Aufstellen der Entscheidungsmatrix .....	133



6.8	Analyse und Interpretation .....	136
6.8.1	Allgemeine Betrachtungen .....	136
6.8.2	Anwendung von Entscheidungsregeln bei Ungewissheit .....	137
6.8.3	Anwendung von Entscheidungsregeln bei Unsicherheit.....	138
6.8.4	Sensitivitätsanalysen .....	141
6.8.5	Interpretation der Ergebnisse .....	144
6.9	Zusammenfassung .....	145
<b>7</b>	<b>Resümee und Ausblick.....</b>	<b>147</b>
7.1	Resümee .....	147
7.2	Ausblick .....	150
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>153</b>
<b>Anhang A</b>	<b>HGF-Ansatz mit Defizitanalyse für das Aktivitätsfeld Wohnen und Bauen .....</b>	<b>166</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Steckbriefe des BNB-Systems.....</b>	<b>169</b>
<b>Anhang C</b>	<b>Beispiele zu nominalen, ordinalen und kardinalen Merkmalen .....</b>	<b>171</b>
<b>Anhang D</b>	<b>Zahlenbeispiele zu Entscheidungsregeln unter Ungewissheit.....</b>	<b>172</b>
<b>Anhang E</b>	<b>Bestimmung von Gewichtungsfaktoren nach der AHP-Methode .....</b>	<b>175</b>
<b>Anhang F</b>	<b>Nutzwertanalysen für das Beispielgebäude in allen Szenarien .....</b>	<b>179</b>
<b>Anhang G</b>	<b>Tabellen zu den Sensitivitätsanalysen für das Beispielgebäude.....</b>	<b>186</b>

## ABBILDUNGEN UND TABELLEN

Abbildung 2-1: Erweitertes Säulenmodell des BNB-Zertifizierungssystems [BMVBS (2010, S. 2)] .....	13
Abbildung 2-2: Klassifizierung von Kriterien zur Nachhaltigkeitsbeurteilung .....	15
Abbildung 3-1: Ergebnismatrix mit Ergebnissen $x_{ij}$ .....	33
Abbildung 3-2: Entscheidungsmatrix mit aggregierten Ergebnissen $Y_{ik}$ .....	44
Abbildung 3-3: Szenarien im Feld aus Komplexität und Unsicherheit [nach Dönitz (2009, S. 7) in Anlehnung an Zurek & Henrichs (2007, S. 1284)] .....	46
Abbildung 3-4: Beispielbegriff „mäßig warm“ in der klassischen Logik und der Fuzzy-Logik .....	56
Abbildung 4-1: Elemente des kardinalen Analyseverfahrens .....	62
Abbildung 4-2: Nutzwertfunktionen für Kriterien mit positiver Wirkungsrichtung .....	79
Abbildung 4-3: Elemente des Verfahrens zur Lebenszyklus-Szenarienbewertung .....	81
Abbildung 4-4: Beispiel zur Darstellung dreier Rangfolgen in einem gerichteten Graphen .....	85
Abbildung 4-5: Gebäudemodell .....	87
Abbildung 4-6: Definitionen des Lebenszyklus eines Bauwerks .....	89
Abbildung 4-7: Lebenszyklusphasen eines Gebäudes .....	90
Abbildung 4-8: Ursachen der unplanmäßigen Instandsetzung .....	92
Abbildung 4-9: Gebäudebezogene Maßnahmen bei Änderungsbedarf .....	94
Abbildung 4-10: Schaubild zum Bewertungsablauf .....	99
Abbildung 6-1: Beispielgebäude mit den Grundrissen Zellenbüro, Team-Center und Apartments [DAfStb (2010, S. 17, 20)] .....	111
Abbildung 6-2: Prinzipskizze und Querschnitt der flexiblen Decke [NBB, TPC ibac, RWTH Aachen] .....	113
Abbildung 6-3: Schichtaufbau der Deckenvarianten [eigene Darstellung nach DAfStb (2010)] .....	115
Abbildung 6-4: Nutzwertfunktionen für das Beispielgebäude [eigene Darstellung nach BMVBS (2009c, S.1.1.1/1ff) und BMVBS (2009c, S.2.1.1/1ff)] .....	119
Abbildung 6-5: Einflussfaktoren auf verschiedene Nachfragearten am Beispielgebäude .....	124

Abbildung 6-6:	Entwicklung der Haushaltsgröße und der Zahl der Haushalte in Deutschland von 1991 bis 2008 [eigene Darstellung nach Statistischem Bundesamt (2009b, S. 76)] .....	125
Abbildung 6-7:	Baumdiagramm zur Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten p .....	139
Abbildung 6-8:	Sensitivität der Bayes-Regel gegenüber der Wahrscheinlichkeit für eine lange Nutzungsdauer .....	141
Tabelle 2-1:	Dimensionen der Nachhaltigkeit und Ziele im Bereich Bauen und Wohnen [eigene Darstellung in Anlehnung an Dt. Bundestag (1998, S. 234) und Kohler & Hassler (1999, S. 236)].....	6
Tabelle 2-2:	Ziele der Nachhaltigkeit und ihre substanziellen Mindestanforderungen [Jörissen et al. (2005, S. 34)] .....	11
Tabelle 2-3:	Rentenbarwertfaktor f .....	23
Tabelle 3-1:	Die Dimensionen von Entscheidungsproblemen und ihre Ausprägungen [Auszug nach Grünig & Kühn (2006, S. 12)].....	29
Tabelle 3-2:	Neun-Punkte-Skala [nach Götze & Bloech (2002, S. 190)].....	38
Tabelle 4-1:	Überblick über die Teilprobleme der entwickelten Methodik.....	61
Tabelle 4-2:	Kriterienkatalog des kardinalen Analyseverfahrens .....	75
Tabelle 4-3:	Vergleich mit dem Kriterienkatalog des BNB-Systems .....	76
Tabelle 4-4:	Beispielhaftes Rating für die Einflussnahme der Nutzer auf das Raumklima [eigene Darstellung in Anlehnung an BMVBS (2009c, S.3.1.6/1ff) ] .....	80
Tabelle 4-5:	Aufbau einer n x m- Entscheidungsmatrix $E_{ik}$ .....	84
Tabelle 6-1:	Aufbau der herkömmlichen Decke für Büronutzung (Decke Typ 1a) [nach DAfStb (2010)] .....	112
Tabelle 6-2:	Aufbau der herkömmlichen Decke für Wohnnutzung (Decke Typ 1b) [nach DAfStb (2010)] .....	112
Tabelle 6-3:	Aufbau der flexiblen Decke mit Calciumsulfatplatte (Decke Typ 2) [nach DAfStb (2010)] .....	114
Tabelle 6-4:	Aufbau der flexiblen Decke mit Betonfertigteilplatte (Decke Typ 3) [nach DAfStb (2010)] .....	114
Tabelle 6-5:	Referenzwerte .....	120

Tabelle 6-6:	Wichtungsfaktoren für die Nutzwertanalyse .....	121
Tabelle 6-7:	planmäßiger Instandsetzungsturnus einzelner Bauteilkomponenten [Werte nach BBSR (2009)] .....	122
Tabelle 6-8:	Deskriptoren und deren Ausprägungen für das Beispielgebäude.....	129
Tabelle 6-9:	Zusammenfassung der Szenarien für das Beispielgebäude .....	133
Tabelle 6-10:	Nutzwertanalyse für die Varianten im Szenario 0 (Referenz).....	135
Tabelle 6-11:	Entscheidungsmatrix für das Beispielgebäude ( $\epsilon < 0,01$ ) .....	136
Tabelle 6-12:	Anwendung des erweiterten Indifferenzkriterium mit $\epsilon = 0,05$ .....	137
Tabelle 6-13:	Regret-Matrix für das Beispielgebäude .....	137
Tabelle 6-14:	Anwendung der Entscheidungsregeln bei Ungewissheit auf das Beispielgebäude .....	138
Tabelle 6-15:	Entscheidungsmatrix für das Beispielgebäude mit Eintrittswahrscheinlichkeiten .....	140
Tabelle 6-16:	Anwendung der Entscheidungsregeln bei Unsicherheit auf das Beispielgebäude .....	140
Tabelle 6-17:	Alternative Wichtungsfaktoren zur Sensitivitätsanalyse .....	142
Tabelle 6-18:	Entscheidungsmatrizen für das Beispielgebäude bei unterschiedlichen Diskontraten .....	143



**ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN****Lateinische Buchstaben:**

A	eine Alternative aus $\mathcal{A}$
$\mathcal{A}$	Menge aller Alternativen, Gesamtraum der Alternativen
A*	die favorisierte Alternative aus dem Gesamtraum der Alternativen
AHP	Analytisch hierarchischer Prozess (Entscheidungsverfahren für Multikriterienprobleme)
AP	Versauerungspotential (engl.: <i>Acidification Potential</i> )
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude
BREEAM	BRE Environmental Assessment Method (Britisches Gebäudebewertungssystem)
DGNB	Deutsches Gütesiegel Nachhaltiges Bauen
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V.
EP	Eutrophierungspotential (engl.: <i>Eutrophication Potential</i> )
EPD	Umweltproduktdeklaration (engl.: Environmental Product Declaration)
GWP	Treibhauspotential (engl.: <i>Global Warming Potential</i> )
HGF	Herrmann von Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KG	Kostengruppe
LCA	Ökobilanz (engl.: Life Cycle Assessment)
LCC	Lebenszykluskostenrechnung (engl.: Life Cycle Costing)
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design (Nordamerikanisches Gebäudebewertungssystem)
MAUT	Multiattributive Nutzentheorie (engl.: <i>Multi-Attribute Utility Theory</i> )
ODP	Ozonabbaupotential (engl.: <i>Ozone Depletion Potential</i> )
$p(Z_j)$	Eintrittswahrscheinlichkeit des Umweltzustands $Z_j$
PE ern.	Erneuerbare Primärenergie
PE n.e.	nicht erneuerbare Primärenergie
PE	Primärenergie
POCP	Potential für bodennahe Ozonbildung (engl.: <i>Photochemical Ozone Creation Potential</i> )

PPP	Public-Private-Partnership
R	Bedauern (engl.: <i>Regret</i> ) darüber, dass ein bestimmtes Ergebnis anstelle des bestmöglichen Ergebnisses eingetreten ist
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (Entscheidungsverfahren für Multikriterienprobleme)
TQ	Total Quality (Österreichisches Gebäudebewertungssystem)
$U(x)$	Nutzenfunktion, die den Alternativenraum $\mathcal{A}$ auf die Menge der reellen Zahlen $\mathbb{R}$ abbildet
$u_j(x)$	(Einzel-)Nutzenfunktion, die das Ergebnis bezüglich des j-ten Kriteriums auf die Menge der reellen Zahlen $\mathbb{R}$ abbildet
$x$	Einzelergebnis bezüglich eines Kriteriums
$Y$	aggregiertes Gesamtergebnis bezüglich aller Kriterien
$Z$	Menge aller Umweltzustände, Zustandsraum
$Z_j$	ein (j-ter) Zustand aus $Z$

### Weitere Zeichen und Notationen:

$\rho$	Dichte
$\mu$	Erwartungswert
$\omega$	Unsicherheitspräferenzfunktion
$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen
$A \succ B$	A wird gegenüber B präferiert
$A \prec B$	B wird gegenüber A präferiert
$A \sim B$	Indifferenz zwischen A und B

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Motivation

Die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden kann mittlerweile auf eine recht lange Geschichte zurückblicken. Bereits ab Beginn der 1990er Jahre wurden in verschiedenen Ländern Bewertungssysteme für die Nachhaltigkeit von Gebäuden geschaffen. Zu nennen wären etwa Großbritannien mit BREEAM, das japanische CASBEE, Österreich mit dem Instrument TQ, das nordamerikanische LEED, etc. [BREEAM Office (2009), JaGBC & JSBC (2008), Bruck & Geissler (2002), USGBC (2010)]. Viele dieser Systeme mündeten in einer Zertifizierung für nachhaltige Gebäude, fanden Eingang in die Praxis und erfuhren zum Teil eine internationale Verbreitung (insbesondere BREEAM und LEED).

In Deutschland näherte man sich dem Gebiet lange Zeit hauptsächlich von der theoretischen Seite. Eine Umsetzung in das Bauen fand nur teilweise statt und wurde vor allem durch ein Interesse der Politik an dem Thema vorangetrieben (z.B. in Form des Energieausweises oder des Leitfadens Nachhaltiges Bauen, BBR (2001)). Mit der Einführung der ersten deutschen Zertifizierungssysteme *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude* (BNB) und *DGNB Zertifikat* [BMVBS (2010), DGNB (2009)] steigerte sich jüngst die praktische Bedeutung der Nachhaltigkeitsbewertung sprunghaft, was sich durch das immer deutlicher erkennbare Interesse des Marktes verstärkt [Barthauer (2008)].

Scheinbar ist das Problem der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden mit den nun vorliegenden Zertifizierungssystemen gelöst. Es gibt einen Kriterienkatalog, auf den man sich am runden Tisch unter Einbeziehung interessierter Kreise einigen konnte. Außerdem existieren detaillierte verbindliche Vorgaben, wie eine Zertifikats-konforme Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden durchzuführen ist. Leider ist der Kriterienkatalog sehr umfangreich. Zudem erfolgt die Bewertung innerhalb eines engen Rahmens und die vorgegebenen Randbedingungen sind strikt einzuhalten. Dies ist freilich der Tatsache geschuldet, dass bei einer Zertifizierung die weitestgehende Vergleichbarkeit oberstes Gebot ist.

Ein Grundproblem blieb jedoch auch bei der Entwicklung der Zertifizierungssysteme bestehen: wie soll man indirekte Einflüsse, wie z.B. hohe Anpassbarkeit, einfache Instandhaltung, etc. quantifizieren? Sie spielen beim nachhaltigen Bauen eine wichtige Rolle, denn zweifelsohne kommt kein „nachhaltiges“ Gebäude zustande, wenn nicht die Planung heute schon zukünftige Eventualitäten berücksichtigt. Doch wie bewertet man diese Zukunftsfähigkeit, wenn die genauen künftigen Umstände unbekannt sind? Schließlich kann der Lebensweg des Bauwerks nicht vorhergesagt werden, er ist vielmehr als ungewiss zu bezeichnen.



In den Zertifizierungssystemen werden derartige indirekte Einflüsse mit Hilfe von Checklisten<sup>1</sup> bewertet. Mit ihnen kann einem Gebäude nach einem festen Bewertungsschema eine Note zugewiesen werden (was im Rahmen der Zertifizierung ausreichend ist), doch für grundsätzliche Fragestellungen zur Bewertung vorausschauender Planungsansätze unter dem Eindruck der ungewissen Zukunft sind sie nicht geeignet. Hierin ist der Ansatzpunkt für die vorliegende Arbeit zu sehen.

### 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die methodische Weiterentwicklung der Nachhaltigkeitsanalyse von Baukonstruktionen. Dabei wird die Nachhaltigkeitsanalyse als Instrument zum Erkenntnisgewinn und damit zur Förderung nachhaltigen Bauens verstanden.

Grundgedanke ist zum einen die Verwendung von Kriterien mit direktem Bezug zum Leitbild des Nachhaltigen Bauens. Zum anderen besteht die Absicht im expliziten, methodischen Einbezug der unbekannten Zukunft. Die zu entwickelnde Methodik soll einen Wissensbeitrag auf dem Gebiet der Nachhaltigkeitsanalyse leisten, indem erstens ein kardinales Analyseverfahren für beliebige Baukonstruktionen vorgestellt wird und zweitens Methoden aus der Entscheidungstheorie übertragen werden.

Das Anwendungsgebiet für die vorgestellte Methodik liegt zum einen im Variantenvergleich während der Planungsphase realer Bauprojekte. Zum anderen sollen mit ihr wissenschaftliche Grundsatzfragen und gleichermaßen Fragestellungen bei der Neuentwicklung von Konstruktionen in der Bauforschung bearbeitet werden können.

### 1.3 Vorgehensweise

Die Arbeit beginnt mit einer Klärung des Begriffes „Nachhaltiges Bauen“ in Kapitel 2, indem die allgemeinen Ziele der nachhaltigen Entwicklung auf den Bausektor übertragen werden. Es folgt eine Analyse des aktuellen Stands der Nachhaltigkeitsbewertung als Ausgangssituation für die vorliegende Arbeit. Ein Fokus liegt hierbei auf verschiedenen methodischen Ansätzen bei der Entwicklung von Kriterien für nachhaltiges Bauen. Ferner wird ein Versuch unternommen, die Vielfalt der Kriterien zu klassifizieren, und wichtige Kriterien aus der aktuellen Nachhaltigkeitsdebatte werden näher vorgestellt.

Die Auswahl von Varianten im Planungsprozess stellt ein Entscheidungsproblem dar. Daher werden in Kapitel 3 die Grundlagen der Entscheidungstheorie dargelegt. Es wird gezeigt, dass es sich bei der Nachhaltigkeitsbewertung um ein sogenanntes

---

<sup>1</sup> Die Checklisten bestehen aus Einzelanforderungen, für die jeweils Punkte vergeben werden, z.B. „lichte Raumhöhe  $\geq 2,75$  m“ oder „mindestens 4 m Schmutzfangzone am Eingang“ [BMVBS (2009c, S.3.2.3 und S. 4.1.3)].

Multikriterienproblem und gleichzeitig um ein Entscheidungsproblem unter Ungewissheit handelt. Daher wird zunächst ein Überblick über klassische Entscheidungsverfahren für Multikriterienprobleme gegeben. Anschließend werden Methoden für Ungewissheitssituationen vorgestellt. Dabei wird bereits die Übertragbarkeit der Methoden auf die vorliegende Zielstellung angerissen.

Den Kern der Arbeit enthält Kapitel 4 mit der entwickelten Methodik zur Nachhaltigkeitsanalyse von Baukonstruktionen unter Berücksichtigung des ungewissen Lebenswegs. Nachdem zunächst Aufgabenstellung und Anwendungsbereich konkretisiert werden, wird ein zweiteiliger Lösungsansatz vorgestellt. Für den ersten Teil wird eine kardinale Nachhaltigkeitsanalyse aus den Zielen des nachhaltigen Bauens abgeleitet. Der zweite Teil behandelt den systematischen Einbezug der Ungewissheit mittels Szenarien. Im Anschluss werden die Konsequenzen dargestellt, die sich aus dem Lösungsansatz für die Modellbildung bei der Gebäudebewertung ergeben. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenstellung des Bewertungsablaufs.

Im anschließenden Kapitel 5 werden mögliche Anwendungsfelder für die entwickelte Methodik aufgezeigt. Beispielhaft werden sechs unterschiedliche Themenfelder näher beleuchtet. Dabei wird jeweils die Einbindung des Themenfelds in das Nachhaltige Bauen beschrieben. Anschließend werden Anregungen zu möglichen Bauwerksvarianten gegeben und um Ansätze zur Szenarienbildung ergänzt.

Kapitel 6 enthält ein ausführliches Beispiel zur Anwendung der entwickelten Methodik. Die einzelnen Schritte werden auf die Thematik der Nutzungsflexibilität eines innerstädtischen Geschossbaus angewendet. Sie beginnen mit einer Vorstellung des Untersuchungsgegenstands und der betrachteten Varianten und schließen mit der Interpretation der erzielten Ergebnisse.

Kapitel 7 beschließt die Arbeit mit einem kurzen Resümee, in dem die mit der vorliegenden Arbeit erzielten Ergebnisse in ihrer Bedeutung für das Nachhaltige Bauen eingeordnet werden. Außerdem wird ein Ausblick auf mögliche weitere Forschungsthemen gegeben, die auf der hier vorgestellten Lebenszyklusanalyse von Baukonstruktionen unter Berücksichtigung des ungewissen Lebenswegs aufbauen können.



## **2 AUSGANGSSITUATION**

### **2.1 Einführung**

Die Überlegungen dieser Arbeit konzentrieren sich auf die Weiterentwicklung der Nachhaltigkeitsanalyse von Baukonstruktionen als Instrument zur Förderung nachhaltigen Bauens. Im Folgenden werden deren wesentlichen Grundzüge im inhaltlichen Kontext der Nachhaltigkeitsdebatte dargestellt.

„Nachhaltiges Bauen“ ist dadurch gekennzeichnet, dass es zu einer nachhaltigen Entwicklung beiträgt. Es werden daher zunächst die Ziele der nachhaltigen Entwicklung in ihrer Konsequenz für den Bausektor dargestellt und die Frage gestellt, wie diese Ziele operationalisiert werden können.

Der Nachhaltigkeitsanalyse als Operationalisierungsinstrument widmet sich der darauf folgende Abschnitt. Neben ihrem Anwendungsspektrum werden die beiden gegensätzlichen Ansätze „Top-down“ und „Bottom-up“ vorgestellt.

Für die Entwicklung der Bewertungsmethodik ist die Kenntnis möglicher Bewertungskriterien Voraussetzung. In Abschnitt 2.4 wird daher ein Überblick über Bewertungskriterien und zugehörige Bewertungsmethoden gegeben. Die wichtigen Kriterien „Ökobilanz“ und „Lebenszykluskosten“ werden ausführlich dargestellt.

Das zweite Kapitel schließt mit einer kritischen Analyse des aktuellen Stands der Nachhaltigkeitsbewertung.

### **2.2 Nachhaltiges Bauen**

#### **2.2.1 Politische Ziele**

Ausgangspunkt der meisten Nachhaltigkeitskonzepte in der deutschen Nachhaltigkeitsdebatte ist nach *Jörissen et al.* (2005, S. 17) die Definition der Brundtland-Kommission. Sie erklärt eine Entwicklung als nachhaltig, „wenn sie die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre Bedürfnisse nicht befriedigen können“ [Hauff (1987, S. 46)].

Zum Leitbild einer Nachhaltigen Entwicklung können Bauen und Wohnen als wesentlicher Wirtschaftssektor und Lebensbereich einen wichtigen Beitrag leisten [Grunwald & Kopfmüller (2006, S. 96), Jörissen et al. (2005, S. 162)]. Bereits 1998 wurden von der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. deutschen Bundestages Problemfelder identifiziert und Ziele für den Bausektor abgeleitet [Dt. Bundestag (1998)]. Diese sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

## 2 Ausgangssituation

Tabelle 2-1: Dimensionen der Nachhaltigkeit und Ziele im Bereich Bauen und Wohnen [eigene Darstellung in Anlehnung an Dt. Bundestag (1998, S. 234) und Kohler & Hassler (1999, S. 236)]

Ökologische Dimension	Ökonomische Dimension	Soziale Dimension
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzierung des Flächenverbrauchs</li> <li>• Beendigung der Zersiedelung der Landschaft</li> <li>• Geringhaltung zusätzlicher Bodenversiegelung und Ausschöpfung von Entsiegelungspotentialen</li> <li>• Orientierung der Stoffströme im Baubereich an den Zielen der Ressourcenschonung; Begrenzung und Reduzierung von Massentstoffströmen und Reduzierung der Ressourcenentnahme</li> <li>• Begrenzung und Reduzierung des Verbrauchs nicht erneuerbarer Energieträger</li> <li>• Verringerung der Emissionen und des Abfallaufkommens</li> <li>• Vermeidung der Verwendung und des Eintrags von Schadstoffen in Gebäude bei Neubau, Umbau und Nutzung; Beachtung dieser Prinzipien bei der Schließung des Stoffkreislaufs bei Baumaterialien</li> <li>• Verringerung der Kohlendioxid-Emissionen der Gebäude im Sinne des Beschlusses der Bundesregierung zur 25%-igen Reduktion insgesamt bis zum Jahr 2005</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimierung der Lebenszykluskosten von Gebäuden (Erstellung, Betrieb, Instandhaltung, Rückbau, Recycling etc.)</li> <li>• relative Verbilligung von Umbau- und Erhaltungsinvestitionen im Vergleich zum Neubau</li> <li>• generationenübergreifendes Wirtschaften</li> <li>• Optimierung der Aufwendungen für technische und soziale Infrastruktur</li> <li>• Verringerung des Subventionsaufwandes</li> <li>• dauerhafte Werterhaltung des existierenden Bestandes und rechtzeitige Maßnahmen zur Bauunterhaltung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sicherung bedarfsgerechten Wohnraums nach Alter und Haushaltsgröße; erträgliche Ausgaben für „Wohnen“ auch für Gruppen geringeren Einkommens im Sinne eines angemessenen Anteils des Haushaltseinkommens</li> <li>• Schaffung eines geeigneten Wohnumfeldes, soziale Integration, Vermeidung von Ghettos</li> <li>• Vernetzung von Arbeiten, Wohnen und Freizeit in der Siedlungsstruktur</li> <li>• „Gesundes Wohnen“ innerhalb wie außerhalb der Wohnung</li> <li>• Erhöhung der Wohneigentumsquote unter Entkopplung von Eigentumsbildung und Flächenverbrauch</li> <li>• Schaffung bzw. Sicherung von Arbeitsplätzen im Bau- und Wohnungsbereich</li> <li>• sichere Wohnungsversorgung</li> <li>• Sicherung der materiellen Substanz historischen Kulturguts</li> </ul>

In der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie wird mit vier Themengebieten von Generationengerechtigkeit über Lebensqualität und sozialem Zusammenhalt bis hin zur internationalen Verantwortung das breite Spektrum der Nachhaltigkeitsthemen abgebildet [Bundesregierung (2002, S. 89–130)]. In regelmäßigen Berichten wird die Entwicklung von über zwanzig Aspekten<sup>2</sup> beobachtet, um einen Aufschluss über den Stand der nachhaltigen Entwicklung zu geben [Statistisches Bundesamt (2008)].

Unter diesen Aspekten stehen vor allem Ressourcenschonung, Klimaschutz, erneuerbare Energien sowie Flächeninanspruchnahme mit dem Baubereich in Verbindung. Ein erstes Ziel besteht in der Verdoppelung der Energieproduktivität bis 2020 gegenüber 1990 [Statistisches Bundesamt (2008, S. 5)]. Anteile des Bauwesens liegen dabei im Energiebedarf für die Produktion sowie indirekt im Heizenergie- und Warmwasserbedarf der hergestellten Gebäude. Ferner wird das Ziel verfolgt, die Rohstoffproduktivität bis zum Jahr 2020 bezogen auf das Basisjahr 1994 zu verdoppeln [ebd., S. 6]. Hierauf hat das Baugewerbe als Branche mit hohem Materialverbrauch (44 % des gesamten Primärmaterialeinsatzes) einen großen Einfluss [ebd., S. 7]. Im Bereich des Klimaschutzes hat sich Deutschland verpflichtet, seine Emissionen der im Kyoto-Protokoll genannten Treibhausgase bis 2012 gegenüber dem Jahr 1990 um 21 % zu reduzieren [ebd., S. 8]. Treibhausgasemissionen entstehen im Bauwesen vor allem durch die Nutzung fossiler Energieträger in den Vorketten sowie bei der Zementproduktion durch die Entsäuerung des Kalksteins. Im Bereich der erneuerbaren Energien ist es Zielsetzung der Bundesregierung, bis zum Jahr 2020 deren Anteil am Primärenergieverbrauch auf 10 % zu erhöhen [ebd., S. 10–11]. Auch hier kann das Bauwesen bei der für die Produktion eingesetzten Energie sowie bei der Deckung von Heizenergie- und Warmwasserbedarf einen Beitrag leisten. Die Inanspruchnahme neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke soll bis zum Jahr 2020 auf 30 Hektar (ha) pro Tag begrenzt werden [ebd., S. 12]. Hierzu müssen sich Bautätigkeiten auf bereits genutzte Flächen konzentrieren.

Bei einigen weiteren Aspekten kann das Bauwesen als Wirtschaftszweig und Arbeitsbranche ebenfalls zur nachhaltigen Entwicklung beitragen, auch wenn die Aspekte eher allgemeiner Natur und weniger für den Bausektor spezifisch sind. So strebt die Bundesregierung unter anderem an, die Forschungsausgaben von Wirtschaft, Staat und Hochschulen zu steigern, die Gütertransportintensität bis zum Jahr 2020 um 5 %

---

<sup>2</sup> Die einzelnen Aspekte sind: Ressourcenschonung, Klimaschutz, erneuerbare Energien, Flächeninanspruchnahme, Artenvielfalt, Staatsverschuldung, wirtschaftliche Zukunftsvorsorge, Innovation, Bildung, wirtschaftlicher Wohlstand, Mobilität, Landbewirtschaftung, Luftqualität, Gesundheit und Ernährung, Kriminalität, Beschäftigung, Perspektiven für Familien, Gleichberechtigung, Integration, Entwicklungszusammenarbeit, Märkte öffnen

gegenüber dem Basisjahr 1999 zu verringern, den Anteil des Schienenverkehrs an der Güterbeförderungsleistung im Inland bis zum Jahr 2015 auf 25 % zu und den Ausstoß von Luftschadstoffen weiter zu reduzieren [ebd., S. 20, 30, 34, 41]. Weitere Ziele sind eine Erwerbstätigenquote von 75% bis 2020, genügend Ausbildungsplätze für Jugendliche und geringere Lohnunterschiede zwischen Frauen und Männern [ebd. S. 50, 22, 54-55].

Auch aus der Nachhaltigkeitsstrategie der Europäischen Union können Ziele abgeleitet werden [Rat der Europäischen Union (2006, S. 7–21)]. Unter diesen bestehen bei den folgend genannten Zielen Bezüge zum Bausektor:

- Einsparung beim Endenergieverbrauch
- Verringerung von verkehrsbedingtem Lärm
- Förderung nachhaltiger Produktion
- Verringerung der Gesamtnutzung nicht erneuerbarer natürlicher Ressourcen
- Vermeidung der Übernutzung erneuerbarer natürlicher Ressourcen
- Stopp des Rückgangs der biologischen Vielfalt
- Abfallvermeidung
- Schutz vor Gesundheitsbedrohungen
- Achtung der kulturellen Vielfalt
- Begrenzung der Klimaänderung und ihrer negativen Auswirkungen
- Wahrung und Verbesserung der Lebensqualität der Bürger als Voraussetzung für dauerhaftes individuelles Wohlbefinden

Die vorgenannten Ziele können auf unterschiedlichen Ebenen des Bauens verfolgt werden. Ihre Umsetzung erfordert ebenso ein Handeln auf den verschiedensten Ebenen – von der Stadtplanung über den Gebäudeentwurf bis zum Gebäudemanagement und von der Gesetzgebung über die Unternehmensführung bis zum Nutzerverhalten. Mit Bezug auf die vorliegende Arbeit wird das Aktionsfeld Planen, Errichten und Nutzen von Gebäuden näher betrachtet.

### **2.2.2 Operationalisierung eines Leitbilds**

In der Praxis stellt sich angesichts der eingangs genannten Ziele die Frage, wie diese auf der Ebene der Gebäude umzusetzen sind. Einerseits hat das Planen, Errichten, Nutzen, Umnutzen und Rückbauen Auswirkungen auf viele der oben genannten Themenfelder, andererseits liegen nicht alle Ziele im Einflussbereich der am Baugeschehen direkt

beteiligten. Es ist eine Operationalisierung<sup>3</sup> des Leitbildes für Planer, Bauherren und Gebäudenutzer erforderlich. Hierzu können einerseits konkrete *Strategien* dienen und andererseits eine *Nachhaltigkeitsbewertung für Gebäude*, die den Vergleich von Planungsalternativen ermöglicht.

Strategien, die als Handlungsempfehlungen oder Planungsgrundsätze aufgefasst werden können, finden sich in der Literatur. Beispielsweise werden im Leitfaden Nachhaltiges Bauen unter anderem die Senkung des Betriebsmittelverbrauchs, die Vermeidung von Transportkosten von Baustoffen und -teilen, oder die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und Baukonstruktionen als Grundsätze genannt [BBR (2001, S. 1)]. Bei der Anwendung solcher Handlungsempfehlungen ist allerdings der Effekt hinsichtlich der Nachhaltigkeitsziele nicht quantifizierbar. Auch ist nicht sichergestellt, dass allgemeingültige Strategien, die für jede Bauaufgabe Gültigkeit besitzen sollen, im Einzelfall zur „nachhaltigsten“ Lösung führen. Als Vorteil solcher Handlungsempfehlungen ist zu werten, dass die Themen und Begriffe dem Arbeitsbereich der am Baugeschehen Beteiligten entstammen und daher leicht kommuniziert werden können.

Der Wunsch nach einer individuellen Optimierung der Bauaufgabe mit nachweislichem Beitrag zur Nachhaltigen Entwicklung erfordert hingegen eine Gebäudebewertung. Auch für Systeme zur Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden existieren viele Beispiele<sup>4</sup>, wie BRE Environmental Assessment Method (BREEAM), Total Quality (TQ), das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen (DGNB) und das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) [BREEAM Office (2009), Bruck & Geissler (2002), DGNB (2009), BMVBS (2010)]. Nachteilig in der Anwendung solcher Systeme ist meist der relativ hohe Aufwand, der zur Nachweisführung erbracht werden muss. Durch die eindeutigen Ergebnisse einer solchen Bewertung wird im Gesamtbild leicht der Eindruck der Unfehlbarkeit erweckt. Jedoch darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die Aussagekraft des Ergebnisses davon abhängt, wie gut die Bewertungsmethodik des Systems die Ziele der Nachhaltigen Entwicklung abbildet. Doch auch jede Strategie oder Handlungsempfehlung muss begründbar sein und nachweislich den Nachhaltigkeitszielen entsprechen. In einem komplexen Themenfeld mit Wechselwirkungen und Abhängigkeiten im Zielsystem, wo dies nicht immer offensichtlich ist, kann die Nachhaltigkeitsanalyse auch zur Absicherung von Strategien eingesetzt werden.

---

<sup>3</sup> Grunwald & Kopfmüller (2006, S. 34) bezeichnen mit 'Operationalisierung' die „Übersetzung der grundlegenden Prämissen nachhaltiger Entwicklung in konkrete praktikable Aufgaben für Politik, Wissenschaft oder andere gesellschaftliche Gruppen“.

<sup>4</sup> Häufig ist in diesen Systemen mit der Bewertung auch eine Zertifizierung verknüpft. Dies ist für alle hier genannten Beispiele der Fall.



### 2.3 Nachhaltigkeitsanalyse

#### 2.3.1 Anwendungsgebiete

Eine nachhaltige Entwicklung kann nur bei Systemkenntnis gezielt gesteuert werden. Hierzu dient die Nachhaltigkeitsanalyse. Ihre Aufgabe ist es, aus dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung konkrete Ziele abzuleiten. Anhand treffender, quantifizierbarer Kriterien werden diese Ziele beschrieben. Damit kann zum einen der heutige Zustand festgestellt und der Fortschritt der nachhaltigen Entwicklung beobachtet werden. Zum anderen kann auch eingeschätzt werden, wie sich bestimmte Maßnahmen auswirken werden und inwiefern sie den Zielen einer nachhaltigen Entwicklung dienlich sind. Insbesondere diese prospektive, also vorausschauende Bewertung ist für das Planen, Bauen und Nutzen von Gebäuden von Interesse. Gelingt es, Kriterien zu identifizieren, anhand derer festgestellt werden kann, wie sehr ein Gebäude zur nachhaltigen Entwicklung beiträgt, so können Entscheidungen im Planungsprozess gezielt danach ausgerichtet werden.

Für die Ableitung von Zielen und Kriterien aus dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung gibt es zwei Ansätze, die im Folgenden vorgestellt werden: das normative Vorgehen von oben nach unten (sog. Top-down-Ansatz) und der praxisorientierte Bottom-up-Ansatz von unten nach oben [Jörissen et al. (2005, S. 26)].

#### 2.3.2 Top-down-Ansatz

Der *Top-down*-Ansatz nähert sich dem Problem ethisch-normativ, indem ausgehend vom Leitbild für eine nachhaltige Gesellschaft die notwendigen Ziele abgeleitet werden. Im anschließenden Schritt müssen Kriterien entwickelt werden, die die Ziele treffend beschreiben. In Top-down-Ansätzen wird die Argumentationslinie offengelegt und es ergibt sich ein vollständiges Zielsystem. Die Hauptproblemstellung besteht dann darin, für ein gegebenes Ziel die passenden Kriterien zu dessen Beurteilung zu finden. Top-down-Ansätze beziehen sich typischerweise auf gesamtgesellschaftliche Analysen oder auf größere Aktivitätsfelder, wie z.B. Ernährung und Landwirtschaft oder Bauen und Wohnen.

Als Beispiel eines solchen Zielsystems ist der Ansatz der Herrmann von Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren (HGF) zu nennen. Der HGF-Ansatz basiert auf den drei gesamtgesellschaftlich geltenden Nachhaltigkeitszielen „Sicherung der menschlichen Existenz“, „Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivkapitals“ und „Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten“. Die Ziele werden durch sogenannte substanzielle Mindestanforderungen weiter konkretisiert, wie sie in Tabelle 2-2 angegeben sind [Jörissen et al. (2005, S. 41–239)].

Für das Aktionsfeld Wohnen und Bauen wurden von *Jörissen et al.* (2005) bereits für alle fünfzehn Punkte des Zielsystems Problemfelder identifiziert (vgl. Anhang A), ohne jedoch konkrete Kriterien abzuleiten. Möchte man diesen Ansatz für die Nachhaltigkeitsanalyse von Gebäuden weiter „nach unten“ verfolgen, so ist zu überprüfen inwiefern die identifizierten Problemfelder bezogen auf die Gebäudeplanung von Bedeutung sind und sich daraus geeignete Kriterien ableiten lassen. Dabei fällt es für viele der genannten Problemfelder schwer, den Anknüpfungspunkt zur Gebäudeplanung herzustellen und das Thema in geeignete Kriterien für Gebäude zu übersetzen. Andererseits fehlen Problemfelder, die aus Sicht der Gebäudeplanung relevant sind, wie z.B. das barrierefreie Bauen. Das Zielsystem des HGF-Ansatzes bleibt damit relativ abstrakt, worin sich der Schwachpunkt des Top-down-Ansatzes zeigt.

Tabelle 2-2: Ziele der Nachhaltigkeit und ihre substanziellen Mindestanforderungen [*Jörissen et al.* (2005, S. 34)]

<b>1</b>	<b>Sicherung der menschlichen Existenz</b>	<b>2</b>	<b>Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivkapitals</b>	<b>3</b>	<b>Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten</b>
1.1	Schutz der menschlichen Gesundheit	2.1	Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen	3.1	Chancengleichheit im Hinblick auf Bildung, Beruf, Information
1.2	Gewährleistung der Grundversorgung	2.2	Nachhaltige Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen	3.2	Partizipation an gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen
1.3	Selbstständige Existenzsicherung	2.3	Nachhaltige Nutzung der Umwelt als Senke	3.3	Erhaltung des kulturellen Erbes und der kulturellen Vielfalt
1.4	Gerechte Verteilung der Umweltnutzungsmöglichkeiten	2.4	Vermeidung unvertretbarer technischer Risiken	3.4	Erhaltung der kulturellen Funktion der Natur
1.5	Ausgleich extremer Einkommens- und Vermögensverhältnisse	2.5	Nachhaltige Entwicklung des Sach-, Human- und Wissenskapitals	3.5	Erhaltung der sozialen Ressourcen

### 2.3.3 Bottom-up-Ansatz

Anders als der Top-down-Ansatz nähert sich der *Bottom-up*-Ansatz der Nachhaltigkeit aus dem Kontext einer konkreten Problemstellung. Die Analyse beginnt hier mit der Sammlung von Kriterien. Ausgehend von den als relevant identifizierten Kriterien wird das Zielsystem aufgebaut. Damit bieten Bottom-up-Ansätze die Möglichkeit, eine

problemorientierte und praxistaugliche Nachhaltigkeitsbewertung zu entwickeln, die auf ein relativ kleines Aktivitätsfeld, wie z.B. das Planen, Bauen und Nutzen von Gebäuden, beschränkt ist.

Als Kritik an diesem Ansatz wird von *Jörissen et al.* (2005, S. 21) angebracht, dass die Nachhaltigkeitsanalysen oft einer disziplinären Sichtweise verhaftet blieben und Zielkonflikte und Wechselwirkungen mit anderen Sektoren leicht übersehen würden. Des Weiteren wird in der Literatur auf das sogenannte Pyramiden-Dilemma hingewiesen [Hoffmann (2006, S. 17), SRU (1994), Radke (1999, S. 180)]. Übertragen auf die Pyramide „Leitbild-Ziele-Kriterien“ besteht demnach die Gefahr, die Spitze der Pyramide zu verfehlen, so dass der Kriterienkatalog nicht zielführend wäre.

Der Bottom-up- und der Top-down-Ansatz schließen sich jedoch gegenseitig nicht aus und können auch parallel angewendet werden.

### **2.3.4 Aktueller Stand der Nachhaltigkeitsanalyse für Gebäude**

Als erstes ganzheitliches System in Deutschland zur Nachhaltigkeitsanalyse und -zertifizierung von Gebäuden darf das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen gelten [Graubner & Lützkendorf (2008)]. Das Kernsystem geht auf Forschungsarbeiten im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) ab dem Jahr 2006 zurück [Graubner, Lützkendorf et al. (2007), Graubner, Lützkendorf et al. (2008)].

Das System sieht eine Gliederung nach Schutzzielen im sogenannten Drei-Säulen-Modell vor, welches die Nachhaltigkeitsanalyse nach Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft unterteilt. In der Folgezeit wurde das System durch Einbezug weiterer Akteure und der Öffentlichkeit über den „Runden Tisch Nachhaltiges Bauen“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) weiterentwickelt. Die ursprünglich ausgewählten Kriterien wurden dabei auf deren Anregungen hin erweitert. Als Nachfolgesystem wurde 2009 das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) offiziell in die Praxis eingeführt [BMVBS (2010)]. Die drei Säulen werden in der nun vorliegenden Form um die technische Qualität und die Prozessqualität ergänzt (vgl. Abbildung 2.1). Das System vereint damit den problemorientierten Bottom-up-Ansatz mit dem theoretischeren Top-down-Ansatz und stellt einen Konsens interessierter Kreise dar.

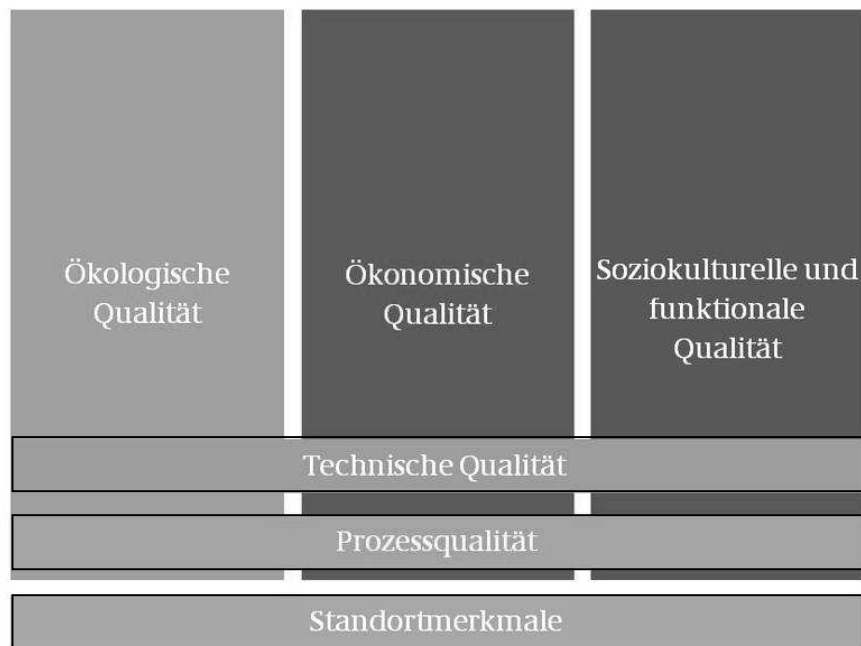


Abbildung 2-1: Erweitertes Säulenmodell des BNB-Zertifizierungssystems [BMVBS (2010, S. 2)]

Als Kritik am bestehenden Bewertungssystem kann angemerkt werden, dass die Zahl der Kriterien letztlich recht umfangreich wurde, was den Bearbeitungsaufwand erhöht. In der Literatur findet sich auch prinzipielle Kritik am verwendeten Drei-Säulen-Modell. Die drei Bereiche stellen eigenständige Systeme dar, die jedoch miteinander gekoppelt sind. Da die drei Systeme teilweise miteinander in Konkurrenz stehen, ergeben sich zwangsläufig Zielkonflikte. Jörissen *et al.* (2005, S. 21–22) bemängeln, dass sich aus dem Ansatz keine Priorität für eine bestimmte Säule ableiten lasse, und daher keine Regeln für den Umgang mit Zielkonflikten. Dem ist entgegenzuhalten, dass sich dieses Modell in der öffentlichen und politischen Debatte Deutschlands weitgehend durchgesetzt hat [ebd. S. 21]. Bereits die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. deutschen Bundestages [Dt. Bundestag (1998)] stützte sich bei den Nachhaltigkeitszielen für den Bausektor auf das Drei-Säulen-Modell (vgl. Abschnitt 2.2.1). Auch in der internationalen Normung (vgl. ISO/TS 21929-1) wird es verwendet. Außerdem baut das System letztlich auf den Schutzzielen eines Top-Down-Ansatzes auf, wie z.B. „Verringerung der Ressourceninanspruchnahme“, denen sich die einzelnen Kriterien zuordnen lassen. Diese wurden lediglich nach den bekannten Säulen gruppiert.

### 2.4 Bewertungskriterien

#### 2.4.1 Vielfalt und Eignung der Kriterien

Die Nachhaltigkeitsanalyse von Bauwerken steht schon seit längerem im Fokus der Forschung. International wurde dabei eine Vielzahl verschiedener Systeme zur Nachhaltigkeitsanalyse, -beurteilung und teils -zertifizierung von Bauwerken mit einer noch größeren Anzahl an Bewertungskriterien entwickelt. Das europäische Forschungsnetzwerk CRISP verzeichnete bereits 2003 für den Baubereich über 500 Indikatoren aus 40 europäischen und nordamerikanischen Indikatorensystemen [Bourdeau & Nibel (2004, S. 5)]. Die aktuellen Systeme zur Gebäudezertifizierung in Deutschland stützen sich ebenfalls auf eine große Zahl von Kriterien [(BMVBS (2010), DGNB (2009)]. Auch die internationale Normung beschäftigt sich mit der Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden<sup>5</sup> und entsprechenden Kriterien. Mit der Norm ISO 21931-1 liegt bereits eine Kriterienliste zur Bewertung der ökologischen Qualität vor, entsprechende Arbeiten zur ökonomischen und sozialen Qualität laufen noch.

Bei Durchsicht der bislang existierenden Kriterien kann festgestellt werden, dass es für jedes Nachhaltigkeitsziel mehrere alternative Kriterien gibt. Je nach Aufgabenstellung können andere Kriterien sinnvoll sein. Grundsätzlich ist ein Kriterium für den jeweiligen Anwendungsfall geeignet, wenn es das Nachhaltigkeitsziel zutreffend beschreibt und gleichzeitig praktikabel anwendbar ist. In Summe sollten die gewählten Kriterien die Bandbreite der Nachhaltigkeitsziele berücksichtigen. Zwar beschreiben alternative Kriterien dasselbe Ziel, doch unterscheiden sie sich hinsichtlich Aussagekraft und Auswertungsaufwand. In dieser Arbeit werden Kriterien nach ihrer Wirkungsweise in *direkte* und *indirekte* Kriterien unterschieden<sup>6</sup>. Außerdem werden sie nach ihrem Bezug zum Bewertungsobjekt als gebäudebezogene bzw. prozessbezogene Kriterien charakterisiert (vgl. Abbildung 2-2). Was unter den Begriffen zu verstehen ist, wird im Folgenden erläutert.

Beispielsweise steht das Kriterium „Primärenergiebedarf“ direkt mit dem Ziel der Schonung energetischer Ressourcen in Verbindung, denn es enthält per Definition alle energetischen Aufwendungen inklusive Produktions- und Verteilungsverluste. Es wird daher als *direktes Kriterium* bezeichnet. Gleichzeitig ist sein Wert aufwändig zu ermitteln, denn für eine vollständige Erfassung muss der Energiebedarf für die Herstellung der Bauprodukte, für den Betrieb (Heizung, Warmwasser, Beleuchtung, etc.)

---

<sup>5</sup> Die entsprechenden Normungsgremien sind ISO/TC 59/SC 17 „Sustainability in building construction“ und CEN/TC 350 „Sustainability of construction works“.

<sup>6</sup> Vgl. hierzu auch den englischen Begriff „consequential indicator“, der in ISO/TS 21929-1 verwendet wird.

und die Entsorgung der Bauprodukte ermittelt werden. Alternative Kriterien, die ebenfalls das Ziel der energetischen Ressourcenschonung beschreiben, sind z.B. „Kompaktheit des Baukörpers“ und „Solare Unterstützung der Trinkwassererwärmung“. Ein kompakter Baukörper mit günstigem Verhältnis von Oberfläche zu Volumen verringert Wärmeverluste und führt damit zu geringerem Energiebedarf für die Heizung. Ebenso verringert eine solare Unterstützung der Trinkwassererwärmung den Primärenergiebedarf für Warmwasser. Diese Kriterien lassen sich leichter auswerten, sind jedoch auch weniger aussagekräftig und umfassend. Sie werden als *indirekte Kriterien* bezeichnet. Alle oben genannten Kriterien stellen außerdem Beispiele für *gebäudebezogene Kriterien* dar. Ein gänzlich anderes Kriterium für die Schonung energetischer Ressourcen wäre eine getrennte Kostenabrechnung. Können Energieverbräuche für Heizung, etc. einzelnen Nutzern zugeordnet werden und die Kosten damit verbrauchsgerecht umgelegt werden, so stellt dies für die Nutzer einen Anreiz dar, Energie zu sparen. Im Gegensatz zu den oben genannten gebäudebezogenen Kriterien, die die bauliche Beschaffenheit des Gebäudes bewerten, handelt es sich hier um ein Kriterium, das die Organisation von Prozessen bewertet. Derartige Kriterien werden daher als *prozessbezogene Kriterien* bezeichnet.

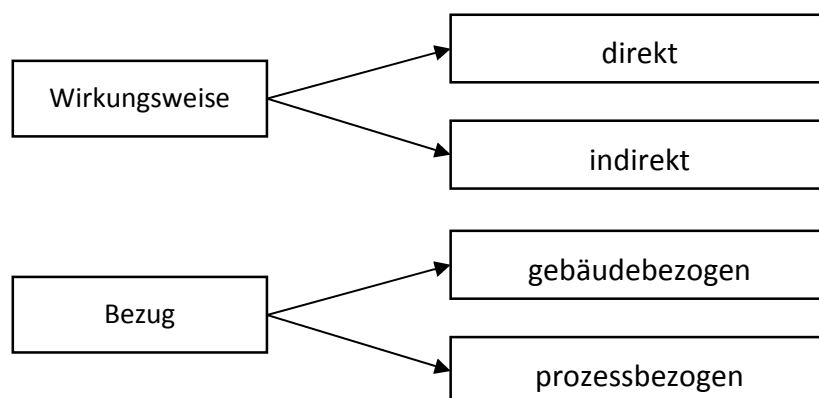


Abbildung 2-2: Klassifizierung von Kriterien zur Nachhaltigkeitsbeurteilung

In aktuellen Systemen zur Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden [z.B. BMVBS (2010)] finden sich sowohl direkte und indirekte als auch gebäudebezogene und prozessbezogene Kriterien.

#### 2.4.2 Quantifizierung der Kriterien

Ebenso vielfältig wie die Zahl der Kriterien sind deren Bewertungsmethoden. Hervorzuheben sind insbesondere die Ökobilanz und die Lebenszykluskostenrechnung als anerkannte Methoden. Ihnen gemeinsam ist, dass sie den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes in die Bewertung miteinbeziehen. Dies setzt streng genommen voraus, dass der gesamte Lebenszyklus bis zum Rückbau des Gebäudes und dessen Entsorgung bekannt oder zumindest vorhersagbar ist. In der Regel werden unbekannte Parameter des Lebenszyklus mit Annahmen belegt. Der Lebenszyklus wird dann für die Auswertung der

Ökobilanz und der Lebenszykluskosten als gegeben angenommen. Unter dieser Voraussetzung ist es möglich, die einzelnen Kriterien jeweils durch eine Messgröße, den sogenannten Indikator, in Zahlen auszudrücken.<sup>7</sup> Da sie für diese Arbeit von besonderer Bedeutung sind, werden sie in den nachfolgenden Abschnitten 2.4.3 und 2.4.4 eingehend vorgestellt.

Für die meisten anderen, insbesondere für die indirekten Kriterien bestehen keine anerkannten Methoden, mit denen sie quantifiziert werden können. Sehr häufig erfolgt eine Bewertung über bewertete Checklisten ohne explizite Lebenszyklusbetrachtung. In bestehenden Nachhaltigkeitsbewertungssystemen für Gebäude [z.B. BMVBS (2010)] stellen sie die meistgenutzte Methode der Kriterienbewertung dar. Die konkrete Ausgestaltung bewerteter Checklisten kann sehr unterschiedlich ausfallen. Gemeinsam ist ihnen, dass für bestimmte Merkmalsausprägungen Punkte erzielt werden, welche aufzusummieren sind. Anhand der erzielten Punktzahl erfolgt die Bewertung auf einer Skala, die meist von Null bis Zehn reicht. Der weitverbreitete Einsatz bewerteter Checklisten im Rahmen bestehender Systeme kann sicher auf die Flexibilität der Methode zurückgeführt werden, sowie auf die Möglichkeit, praktisch jedes „weiche“ Kriterium bewerten zu können. Jedoch sollte nicht aus den Augen verloren werden, dass den scheinbar objektiven Zahlenwerten eine frei gewählte Punkteverteilung zugrundeliegt.

### **2.4.3 Kriterien der Ökobilanzierung**

#### **2.4.3.1 Bedeutung**

Zur Bewertung ökologischer Fragestellungen steht die Methode der Ökobilanzierung, auch LCA (Life Cycle Assessment) genannt, nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 zur Verfügung.

Bei der Betrachtung des Gebäudes umfasst die Ökobilanz alle Inputs und Outputs von der Wiege bis zur Bahre einschließlich aller Vorketten und nachgelagerten Prozesse. Nachdem alle benötigten Ressourcen und entstandenen Emissionen ermittelt worden sind (Sachbilanz), werden diese den potentiellen Umweltwirkungen zugeordnet (Charakterisierung) und hinsichtlich Größe und Bedeutung beurteilt (Wirkungsabschätzung). Es ist kennzeichnend für die Methode der Ökobilanz, dass sie die Bewertung mehrerer verschiedener Kriterien ermöglicht. Eine Reihe von Ökobilanzkriterien sind sowohl hinsichtlich der Berechnungsgrundlagen der Charakterisierung wissenschaftlich anerkannt, als auch durchgängig in einschlägigen Datenbanken enthalten (z.B. Ecoinvent (2010), GaBi 4 (2007)). Dies betrifft Emissionen mit einem Beitrag zu Treibhauseffekt, Zerstörung der Ozonschicht, saurem Regen, Überdüngung und Sommersmog als auch der

---

<sup>7</sup> Es handelt sich um „kardinale“ Messgrößen, vgl. Exkurs in Kapitel 3.3.1

Verbrauch energetischer Ressourcen. Diese Kriterien bilden also die Nachhaltigkeitsziele Klimaschutz und Schutz der Ozonschicht und die Schonung der energetischen Ressourcen ab. Die Verringerung der Belastung von Erde, Wasser und Luft wird ebenfalls in Teilen abgedeckt. Das Kriterium Primärenergie wird dabei nach den erneuerbaren und nicht erneuerbaren Anteilen aufgegliedert.

Durch zusätzliche Wirkungskategorien könnte die Methode der Ökobilanz auf weitere Ziele wie den Schutz der menschlichen Gesundheit, den Erhalt der biologischen Vielfalt, die Verringerung der Zersiedelung und die Schonung materieller Ressourcen ausgeweitet werden. Bislang konnte jedoch bei den entsprechenden Kriterien (z.B. Humantoxizität, Ökotoxizität, Flächenverbrauch, Ressourcenverbrauch) kein wissenschaftlicher Konsens gefunden werden und entsprechende Basisdaten fehlen. Die vorgenannten Nachhaltigkeitsziele müssen bei einer Gebäudebewertung also derzeit durch andere Kriterien abgebildet werden. Wo dies geschieht kann aus Gründen der Praktikabilität zumeist nicht der gesamte Lebenszyklus berücksichtigt werden. Beispielsweise wird die Schonung der Ressource Wasser anhand des Trinkwasserverbrauchs in der Nutzungsphase abgebildet, da dieser einen bedeutenden Anteil ausmacht. Der Wasserbedarf für die Herstellung von Bauprodukten, etc. wird dabei vernachlässigt.

Die Ökobilanz stellt eine anerkannte und verbreitete Methode<sup>8</sup> in der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden dar, die einen Großteil der ökologischen Aspekte adressiert. Für den praktischen Einsatz der Ökobilanz im Bauwesen liegen mittlerweile konsistente Datenbanken in einem Umfang vor, der für die meisten Fälle ausreicht (z.B. BMVBS (2009b), GaBi 4 (2007)). Die Integration dieser Daten in Ökobilanzierungs-Software, die speziell für Gebäude ausgelegt ist (IfM (unveröffentlicht), sirAdos (o.J.)), ermöglicht eine praktikable Berechnung der LCA von Gebäuden.

---

<sup>8</sup> Dies zeigt auch die mittlerweile weit vorangeschrittene Harmonisierung von Umweltproduktdeklarationen, kurz EPD (Environmental Product Declaration). In EPDs geben Hersteller von Bauprodukten in einem Datenblatt Auskunft über ihre Produkte und weisen neben weiteren Informationen die oben genannten Wirkungskategorien aus.



### 2.4.3.2 Indikatoren

Die Liste der anerkannten Kriterien der Ökobilanzmethode umfasst derzeit:

- Treibhauspotential  $GWP_{100}$  (kg  $CO_2$ -Äq.)
- Ozonabbaupotential ODP (kg R11-Äq.)
- Versauerungspotential AP (kg  $SO_2$ -Äq.)
- Eutrophierungspotential EP (kg  $PO_4$ -Äq.)
- Bodennahe Ozonbildung POCP (kg  $C_2H_4$ -Äq.)
- Primärenergie PE (MJ)

Das *Treibhauspotential*  $GWP$  (Global Warming Potential) ist der potenzielle Beitrag eines Stoffes zum so genannten Treibhauseffekt. Dieser bezeichnet die globale Erwärmung infolge der Emission von Treibhausgasen, zu denen u.a. Kohlendioxid ( $CO_2$ ), Methan ( $CH_4$ ), Lachgas ( $N_2O$ ) und Flurkohlenwasserstoffe zählen. Klimamodelle prognostizieren als Folge der Erderwärmung einen Klimawandel mit dem u.a. eine Zunahme von Wetterextremen, Veränderungen der Eisbedeckung und ein Anstieg des Meeresspiegels einhergehen. Der potenzielle Beitrag eines Stoffes wird üblicherweise über einen Zeitraum von 100 Jahren ( $GWP_{100}$ ) gemittelt und relativ zum Treibhauspotenzial von Kohlendioxid in kg  $CO_2$ -Äquivalenten angegeben. [BMVBS (2009c, S. 1.1.1/1), Nakicenovic & Swart (2000)]

Das *Ozonabbaupotential* ODP (Ozone Depletion Potential) ist der potentielle Beitrag eines Stoffes zum Abbau des Ozons in der Stratosphäre, das als sogenannte Ozonschicht einen großen Teil der UV-Strahlung von der Erde abschirmt. Folgen der Abnahme der Ozonschicht („Ozonloch“) sind u.a. bei Mensch und Tier Hautschäden bis hin zu Tumorbildungen und bei Pflanzen Störungen der Photosynthese. Ozonabbauende Stoffe sind Halogenverbindungen, insbesondere die bekannten Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Ihr Ozonabbaupotential ODP wird bezogen auf die Referenzsubstanz R11 (Trichlorfluormethan) in kg R11-Äquivalent angegeben. [BMVBS (2009c, S.1.1.2/1), WMO (2007)]

Das *Versauerungspotential* AP (Acidification Potential) ist der potentielle Beitrag eines Stoffes zur Versauerung, d.h. einer Abnahme des pH-Wertes in Luft, Wasser und Boden verstanden. Anthropogene Emissionen von Stickstoffverbindungen (v.a. Stickoxide  $NO_x$ , Ammoniak  $NH_3$ ) und Schwefelverbindungen (u.a. Schwefeldioxid  $SO_2$ , Schwefelwasserstoff  $H_2S$ ) bewirken eine Versauerung des Niederschlags und schließlich von Böden und Gewässern. Damit tragen die Emissionen zum Waldsterben bei und können in Oberflächengewässern zum Artenrückgang führen. Der sogenannte saure Regen greift auch Gebäude und Kulturdenkmäler, insbesondere aus Sand- und Kalkstein, an. Das Versauerungspotential AP wird bezogen auf die versauernde Wirkung von

Schwefeldioxid in kg SO<sub>2</sub>-Äquivalent angegeben. [BMVBS (2009c, S.1.1.4/1), Streit (1994), Walletschek (1995)]

Das *Eutrophierungspotential EP* (Eutrophication Potential) beschreibt den potentiellen Beitrag eines Stoffes zur Überdüngung, also der Nährstoffanreicherung an einem Standort. Durch die Zufuhr von Nährstoffen, insbesondere Phosphate und Stickstoffverbindungen, in Gewässer und Böden wird das biologische Gleichgewicht gestört. Dies wirkt sich z.B. in Gewässern durch eine vermehrte Algenbildung aus, die unter anderem Fischsterben zur Folge haben kann. Das Eutrophierungspotential EP wird relativ zur Wirkung von Phosphat in kg PO<sub>4</sub>-Äquivalenten angegeben. [BMVBS (2009c, S. 1.1.5/1)]

Mit dem *Potential für bodennahe Ozonbildung POCP* (Photochemical Ozone Creation Potential) wird der potentielle Beitrag von Stoffen zur Bildung von troposphärischem, d.h. bodennahem Ozon erfasst. Ozon, welches in der Stratosphäre eine wichtige Schutzfunktion einnimmt („Ozonschicht“), wirkt in der Troposphäre human- und ökotoxisch. Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) tragen in Verbindung mit den Stickstoffoxiden der Luft unter UV-Strahlung zu einer erhöhten Ozonkonzentration am Boden, dem sogenannten Sommersmog, bei. Dieser greift die Atmungsorgane an und schädigt Pflanzen und Tiere. Das bodennahe Ozonbildungspotential POCP wird bezogen auf die Wirkung von Ethen in kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-Äquivalent angegeben. [BMVBS (2009c, S. 1.1.3/1), WMO (2007)]

Das Kriterium *Primärenergie PE* (Primary Energy) beschreibt den Verzehr energetischer Ressourcen. Primärenergie ist die in natürlich vorkommenden Energiequellen zur Verfügung stehende Energie. Zu ihr zählen nicht erneuerbare Energien (u.a. aus Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uran) sowie erneuerbare Energien (u.a. aus Biomasse, Sonnenstrahlung, Erdwärme, Wasser- und Windkraft). Der energetische Ressourcenverzehr ist zum einen mit vielfältigen Umweltschädigungen verbunden, die bei Rohstoffgewinnung, Verarbeitung und Energienutzung entstehen, und wird oft als stellvertretender Indikator für die Summe der Umweltwirkungen betrachtet. Zum anderen werden durch die Erschöpfung von Ressourcen künftigen Generationen Handlungsmöglichkeiten genommen. Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung ist daher die Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen zu minimieren. Gleichzeitig soll die Nutzungsrate erneuerbarer Ressourcen deren Regenerationsrate nicht überschreiten. Der Primärenergiebedarf wird in MJ oder auch in kWh angegeben. [BMVBS (2009c, S. 1.2.2/1), Bundesregierung (2002, S. 93)]

### 2.4.4 Kriterium Lebenszykluskosten

#### 2.4.4.1 Bedeutung

Unter dem Begriff Lebenszykluskosten werden alle Kosten zusammengefasst, die während des Lebenszyklus eines Gebäudes anfallen, also Herstellkosten, Betriebskosten, Instandhaltungskosten und Abbruch- und Entsorgungskosten. Einnahmen, z.B. aus Vermietung, werden üblicherweise *nicht* mit den Kosten verrechnet. Die Sichtweise entspricht also nicht der eines Investors, der die Investition den Mieteinnahmen und/oder dem Veräußerungserlös gegenüberstellen möchte. Sie entspricht eher dem Bauherrn eines selbstgenutzten Gebäudes<sup>9</sup>.

Die Lebenszykluskosten haben sich in Deutschland als Kriterium für nachhaltige Gebäude etabliert [BMVBS (2010), DGNB (2009)]. Die Aufnahme der Lebenszykluskosten als Kriterium bei Nachhaltigkeitsbewertungen für Gebäude kann sicherlich zu höherer Akzeptanz beitragen. Bewertungssysteme, die allein auf Umweltaspekte abzielen, sind für viele Akteure im Bauwesen nur von geringem Interesse. Andererseits darf kritisch hinterfragt werden, inwiefern dieses Kriterium die ökonomischen Ziele des nachhaltigen Bauens *vollständig* abbildet.

Im Hinblick auf ein generationenübergreifendes Wirtschaften sind niedrige Lebenszykluskosten zielführend. Wird bei Entscheidungen allein auf die heutigen Herstellkosten geschaut, so kann dies bedeuten, dass den kommenden Generationen höhere Kosten (z.B. für Energie oder Entsorgung) aufgebürdet werden. Dem wird durch gezielte Berücksichtigung der Folgekosten entgegengewirkt. Da auch die Kosten für Instandhaltungen berücksichtigt werden, kann ferner zur dauerhaften Werterhaltung des zukünftigen Gebäudebestandes beigetragen werden. Auch ist ein insgesamt sparsamer Umgang mit den begrenzten finanziellen Ressourcen insofern sinnvoll, als das Ersparnis für andere Investitionen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung zur Verfügung steht.

Andererseits nimmt man mit der Betrachtung der Lebenszykluskosten eine betriebswirtschaftliche Perspektive ein, die nicht unbedingt zu einer volkswirtschaftlichen Optimierung führt. Eine möglichst geringe Gesamtinvestitionssumme kann, auch wenn sie den ganzen Gebäudelebenszyklus umfasst, mit anderen Nachhaltigkeitszielen im Konflikt stehen. Werden die Lebenszykluskosten auf Basis tatsächlicher Preise bestimmt, so kann eine Preisminimierung falsche Anreize setzen. Niedrige Preise, die auf unsoziale

---

<sup>9</sup> König, Kohler, et al. (2009, S. 60) stellen hierzu klar, es „hat sich für die Lebenszykluskostenrechnung eine allgemeine Perspektive, nämlich die der selbstnutzenden Eigentümer im Sinne eines „total cost of ownership“ herauskristallisiert. Sie bildet die Grundlage für eine allgemeine Beurteilung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit, aber sie ersetzt ausdrücklich nicht die akteursbezogene Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung und Risikobeurteilung.“

Praktiken zurückzuführen sind (z.B. Lohndumping, Schwarzarbeit, Vernachlässigung von Arbeitssicherheit, Umweltschutz oder Arbeitnehmerrechten, Kinderarbeit in Importländern), laufen offensichtlich einer nachhaltigen Entwicklung zuwider. Kosten werden in diesem Fall nicht eingespart sondern als externe Kosten an andere Stellen verlagert (z.B. in Form von Arbeitsplatzverlust, entgangenen Sozialversicherungsbeiträgen, Unfallkosten etc.). Mittels der Lebenszykluskosten können diese externen Kosten nicht erfasst werden. Ihre Quantifizierung wäre auch nicht sinnvoll durchzuführen und würde das Instrument der Lebenszykluskostenanalyse überfrachten. Stattdessen ist es wichtig, derartige Aspekte durch weitere, vornehmlich prozessbezogene Kriterien abzubilden<sup>10</sup>.

Insgesamt ist die Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing, LCC) eine Methode, die mittlerweile auch im Gebäudebereich anerkannt ist. Zur Berechnung der Herstellkosten sowie zur Prognose von Nutzungskosten stehen einerseits Kostendatenbanken [z.B. BKI (2009), Jones Lang LaSalle (2009), I BGB (2008)] und andererseits Berechnungshilfsmittel zur Verfügung [Riegel (2004), Herzog (2005), sirAdos (o.J.)]. Die Lebenszykluskostenrechnung ist damit im Gebäudebereich gut anwendbar.

#### **2.4.4.2 Kapitalwert als Indikator**

Der Kapitalwert wird mittels der Kapitalwertmethode bestimmt und berücksichtigt den Diskontierungseffekt. Es werden alle Zahlungsströme über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes mit einem Diskontierungsfaktor auf einen einheitlichen Zeitpunkt bezogen und zum Kapitalwert addiert. Liegt dieser Zeitpunkt am Beginn des Betrachtungszeitraums, so spricht man vom Barwert, liegt er am Ende des Betrachtungszeitraums, so spricht man vom Endwert. In der Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken wird als Zeitpunkt üblicherweise der Beginn des Lebenszyklus gewählt, es handelt sich also um eine Barwertberechnung. Der Indikator ist der Barwert der Lebenszykluskosten (€). Dieser kann als derjenige Geldbetrag interpretiert werden, der heute angelegt werden muss, um unter Berücksichtigung von Zins und Zinseszins für alle in Zukunft anfallenden Kosten aufkommen zu können. Die Anwendung der Methode erfordert die Angabe von Preissteigerungen für zukünftige Zahlungen die Angabe der Diskontrate. Von diesen Parametern wird das Ergebnis wesentlich beeinflusst, denn ein im Vergleich zur Preissteigerung hoher Diskontsatz führt dazu, dass in ferner Zukunft liegende Kosten kaum in die Bewertung eingehen.

---

<sup>10</sup> In ähnlicher Weise geschieht dies bei externen Kosten aus dem Umweltbereich. Z.B. werden Kosten der Erderwärmung aufgrund des Treibhauseffekts nicht quantifiziert. Die Reduktion von Treibhausgasemissionen stellt jedoch ein Umweltziel dar und wird im Kriterium Treibhauspotential bewertet.

„Die Kapitalwertmethode stellt ohne Zweifel das in der wissenschaftlichen Literatur am meisten beachtete und am stärksten akzeptierte Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung dar“ [Götze (2008, S. 80)] und hat sich auch in der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden durchgesetzt, wie das Beispiel des BNB zeigt. Bei der Übertragung dieser Methode auf die Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden ist die Wahl der Diskontrate von entscheidender Bedeutung. „Sogar die Rangfolge der Lösungen bei der Beurteilung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit kann beeinflusst werden“ [König, Kohler et al. (2009, S. 62–63)]. Zudem wird in Fachkreisen die generelle Zulässigkeit der Diskontierung über lange Zeiträume, insbesondere unter dem Aspekt des intergenerationellen Nutzens<sup>11</sup> und des langfristigen Wohlfahrtswachstums, diskutiert. Während von einigen die Diskontierung für längere Zeiträume generell abgelehnt wird<sup>12</sup>, legt das Umweltbundesamt verschiedene Diskonraten für unterschiedlich lange Betrachtungszeiträume im Sinne einer Konvention fest: „Für kurzfristige Zeiträume (bis ca. 20 Jahre) ist mit einer Diskontrate von 3 Prozent zu rechnen. Für weiter in die Zukunft reichende Schäden setzen wir die Diskontrate standardmäßig auf 1,5 Prozent. Des Weiteren ist bei generationenübergreifenden Betrachtungen eine Sensitivitätsrechnung mit einer Diskontrate in Höhe von 0 Prozent durchzuführen“ [UBA (2007, S. 37)]. Eine Rate von 3% entspricht dem realen Kapitalmarktzins für risikoarme Anleihen im Rückblick der letzten 150 Jahre. Eine Rate von 1,5% entspricht der zukünftigen Wachstumsrate des Konsums unter der Annahme, dass es künftigen Generationen materiell besser gehen wird als heutigen [ebd.]. Im Deutschen Gütesiegel Nachhaltiges Bauen wird demgegenüber für eine Betrachtung von 50 Jahren eine nominale Diskontrate von 5,5% festgelegt. Diese Größenordnung entspricht etwa den Kapitalkosten für nicht-öffentliche Bauherren [Herzog (2005, S. 245–246)].

### 2.4.4.3 Annuität als Indikator

Die Annuitätenmethode ist eine Form der Lebenszykluskostenrechnung, deren Modell dem der Kapitalwertmethode entspricht. Als Auswertungsgröße wird jedoch nicht der Barwert sondern die Annuität herangezogen [Götze (2008, S. 93–96)]. Die Annuität ist

---

<sup>11</sup> In UBA (2007, S. 36) wird erläutert, dass es sich hierbei „um die Frage [handelt], ob die heute Lebenden ein bestimmtes Ereignis genauso werten wie die künftig Lebenden es tun werden. Aus Sicht des Umweltbundesamtes ist bei generationenübergreifenden Betrachtungen die Nutzendiskontierung ethisch nicht zu rechtfertigen [...]“. Nur das langfristige Wohlfahrtswachstum darf für die Diskontierung berücksichtigt werden.

<sup>12</sup> Beispielsweise kritisieren Ott & Döring (2008, S. 127–136): Ist das Diskontieren „für rein monetäre, kurzfristige Kosten und Nutzen unproblematisch, bewirkt es eine starke Minderschätzung weit in der Zukunft liegender Ereignisse“.

eine Folge gleichbleibender jährlicher Zahlungen, die über den gesamten Betrachtungszeitraum anfallen. Der Barwert dieser gleichbleibenden Zahlungsfolge ist mit dem Barwert der tatsächlichen, unregelmäßigen Zahlungsfolge identisch. Barwert und Annuität können durch den Rentenbarwertfaktor  $f$ , dargestellt in Tabelle 2-3, ineinander überführt werden:

$$Ann = \frac{KW}{f} \quad Gl. 2-1$$

$$f = \frac{(1+i)^T - 1}{(1+i)^T \cdot i} \quad Gl. 2-2$$

mit

$Ann$  jährliche Annuität

$KW$  Barwert

$i$  Diskontrate

$T$  Betrachtungszeitraum in Jahren

Tabelle 2-3: Rentenbarwertfaktor  $f$

Betrachtungs- zeitraum T [a]	Diskontrate i											
	0,0%	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%	3,0%	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%
<b>10</b>	10	9,73	9,47	9,22	8,98	8,75	8,53	8,32	8,11	7,91	7,72	7,54
<b>20</b>	20	18,99	18,05	17,17	16,35	15,59	14,88	14,21	13,59	13,01	12,46	11,95
<b>30</b>	30	27,79	25,81	24,02	22,40	20,93	19,60	18,39	17,29	16,29	15,37	14,53
<b>40</b>	40	36,17	32,83	29,92	27,36	25,10	23,11	21,36	19,79	18,40	17,16	16,05
<b>50</b>	50	44,14	39,20	35,00	31,42	28,36	25,73	23,46	21,48	19,76	18,26	16,93
<b>60</b>	60	51,73	44,96	39,38	34,76	30,91	27,68	24,94	22,62	20,64	18,93	17,45
<b>70</b>	70	58,94	50,17	43,15	37,50	32,90	29,12	26,00	23,39	21,20	19,34	17,75
<b>80</b>	80	65,80	54,89	46,41	39,74	34,45	30,20	26,75	23,92	21,57	19,60	17,93
<b>90</b>	90	72,33	59,16	49,21	41,59	35,67	31,00	27,28	24,27	21,80	19,75	18,03
<b>100</b>	100	78,54	63,03	51,62	43,10	36,61	31,60	27,66	24,50	21,95	19,85	18,10

Die Annuität kann als derjenige Geldbetrag interpretiert werden, der in jedem Jahr bezahlt werden muss, um alle Kosten zu decken. Er besitzt damit gegenüber dem Barwert eine größere Anschaulichkeit. Außerdem ist es möglich, Varianten mit unterschiedlichem Betrachtungszeitraum einander gegenüberzustellen. Mit Hilfe der Annuität können Bauwerke mit unterschiedlicher Lebensdauer bezüglich der Lebenszykluskosten verglichen werden. Die Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Betrachtung ist eine

unendliche Folge identischer Wiederholungen. Dies entspricht der Anschauung: Ist der Lebenszyklus eines Gebäudes beendet, so schließt sich direkt ein neuer Lebenszyklus an. Ein Gebäude mit einer Lebensdauer von 100 Jahren deckt denselben Bedarf wie zwei aufeinanderfolgende Gebäude mit einer Lebensdauer von jeweils 50 Jahren. Da darüber hinaus dieselben Modellannahmen zugrunde liegen, eignet sich die Annuität in gleichem Maße als Indikator für die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden wie der Kapitalwert. Ebenso gelten die oben genannten Überlegungen zum Diskontsatz.

### **2.5 Kritische Analyse der Nachhaltigkeitsbewertung für Gebäude**

In Deutschland hat sich eine Gliederung in Säulen mit ökologischen, ökonomischen, sozialen, sowie zusätzlich technischen und prozessbezogenen Kriterien in der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden durchgesetzt. Die Auswahl der Kriterien erfolgte (z.B. im BNB-System) in einer Synthese aus Bottom-up-Ansatz und Top-Down-Ansatz unter Einbezug interessierter Kreise. Die Auswahl stellt damit einen Konsens vor dem Hintergrund der Zertifizierungsaufgabe dar.

In den aktuellen Systemen zur Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden finden sich sowohl direkte und indirekte als auch gebäudebezogene und prozessbezogene Kriterien, sowie solche, die den gesamten Lebenszyklus umfassen und solche, die nur Ausschnitte davon betrachten.

Die Ökobilanzkriterien gelten als anerkannt, greifen jedoch dort zu kurz, wo für Umweltwirkungen keine abgesicherten Wirkungskategorien vorliegen. Es ist daher sinnvoll den Kriterienkatalog zu ergänzen, insbesondere um die Nachhaltigkeitsziele der Flächenschonung, der Trinkwasserschonung, der Schonung materieller Ressourcen und des Schutzes der menschlichen Gesundheit. Da hier häufig keine Lebenszyklusperspektive eingenommen werden kann, im Sinne der Berücksichtigung aller Vorketten und nachgelagerten Prozesse, sollten sich die Kriterien auf den wesentlichen Einfluss konzentrieren. Beispielsweise beschränkt sich die Beurteilung der Flächeninanspruchnahme auf „das eigentliche (Bau-)Grundstück. Flächen für die Gewinnung von Rohstoffen oder für Produktionsstätten werden (zunächst) nicht berücksichtigt“ [BMVBS (2009c, S. 1.2.4/1)]. Eine solche ausschnittsweise Betrachtung ist zwar im Sinne einer konsistenten Lebenszyklusbetrachtung über alle Kriterien methodisch nicht ganz zufriedenstellend, aber praktikabel.

Auch die Lebenszykluskosten sind ein anerkanntes Kriterium der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden. Sie können jedoch alleine das Problemfeld des nachhaltigen Wirtschaftens nicht abdecken und müssen durch prozessbezogene Kriterien

flankiert werden, um gesamtgesellschaftliche Effekte abzubilden<sup>13</sup>. Im BNB-System geschieht dies z.B. durch das prozessbezogene Kriterium „Ausschreibung und Vergabe“. Durch entsprechende Auswahl von Unternehmen soll Einfluss genommen werden auf u.a. „die regionale Wertschöpfung, den Erhalt von Arbeitsplätzen in der Region, die Durchsetzung von Umwelt- und Sozialstandards (z.B. keine Kinderarbeit) etc.“ [BMVBS (2009c, S.5.1.4/1)]. Derartige prozessbezogenen Kriterien sind wichtig, um Lücken in einem Bewertungssystem zu schließen. Es soll an dieser Stelle jedoch angemerkt werden, dass mit ihnen der Planungs-, Bau- und Nutzungsprozess („wie ein Gebäude gebaut/genutzt wird“) beeinflusst wird und nicht die Gebäudekonstruktion („was für ein Gebäude gebaut wird“).

Werden die Lebenszykluskosten als alleiniges Kriterium der ökonomischen Säule herangezogen, so ist ein weiteres Problem darin zu sehen, dass Vorteile wie Umnutzungsfähigkeit, Instandhaltungsfreundlichkeit u. ä. nicht monetär erfasst werden. Grund hierfür ist, dass für die LCC ein Lebenszyklus mit vorgegebenen Parametern zugrundegelegt wird. Es werden starre Austauschzyklen für Bauprodukte angenommen und das Gebäude wird über einen fest vorgegebenen Zeitraum mit gleichbleibender Nutzung betrachtet. Diese Vorgaben sind zwar für eine Zertifizierung gerechtfertigt, da vergleichbare Ergebnisse angestrebt werden, jedoch kann mit ihnen eine Amortisation von Mehrinvestitionen für adaptive, wartungsarme, leicht instandzuhaltende, etc. Gebäude nicht dargestellt werden. Ebenso gilt dies für die Amortisation ökologischer Mehraufwendungen. Dem beobachteten Mangel wird in den aktuellen Bewertungssystemen durch indirekte Kriterien, die ein ökonomisches Potential abbilden begegnet. Diese sind nicht nur in der ökonomischen Säule [z.B. Drittverwendungsfähigkeit, BMVBS (2009c, S. 2.2.1)], sondern wegen der Mehrfachwirkungen auch in der funktionalen und technischen Säule zu finden.

Eine gezielte, direkte Betrachtung des unbekannten Lebenswegs erfolgt in keinem der bekannten Nachhaltigkeitsbewertungssysteme für Gebäude. Die Behandlung der unsicheren Parameter des zukünftigen Gebäudelebenszyklus war bislang selten Gegenstand des wissenschaftlichen Interesses in der Nachhaltigkeitsbewertung. Sofern das Problem in der Literatur angesprochen wird, erfolgt meist die pauschale Empfehlung, in einer Sensitivitätsanalyse die Empfindlichkeit gegenüber modifizierten Modellansätzen sowie Änderungen von Parametern und Einflussgrößen zu untersuchen. Bekannte Instrumente aus dem Finanzbereich, wie z.B. Risikoanalysen, wurden bislang nicht in Bewertungssysteme übertragen.

---

<sup>13</sup> Für die Nachhaltigkeitsbeurteilung von Infrastrukturbauwerken ist beispielsweise neben den Lebenszykluskosten ein Kriterium für externe Kosten vorgesehen, die den Verkehrsteilnehmern entstehen, wenn Instandhaltungsarbeiten zu Stau führen.



Die Kriterien der gesellschaftlichen bzw. technischen Säule sind in der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden stark durch die Nutzersicht geprägt. Typische Kriterien sind Behaglichkeit (thermisch-hygrisch, akustisch, visuell), Barrierefreiheit, Schallschutz und Qualität der Innenraumluft sowie gestalterische und funktionale Aspekte. Aus dem problemorientierten Ansatz heraus betrachtet, handelt es sich um wesentliche gebäuderelevante Aspekte, da sie von Bauherren, Nutzern, usw. direkt erlebt und damit insbesondere wahrgenommen werden. Aus dem Top-down-Ansatz heraus sind sie folgenden Schutzzielen zugeordnet:

Dem Schutzziel „menschliche Gesundheit“ dienen z.B. die direkten Kriterien Schallschutz, Innenraumluftqualität. Die Kriterien betreffen die Gesundheit der Nutzer und beziehen sich daher nur auf die Nutzungsphase. Eine Ausweitung auf andere Lebenszyklusphasen ist durch prozessbezogene Kriterien, wie „Arbeitsschutz auf der Baustelle“ möglich.

Das Kriterium Barrierefreiheit ist ein direktes Nachhaltigkeitskriterium – ebenfalls auf die Nutzungsphase bezogen – im Sinne der Forderung nach Chancengleichheit für Menschen mit und ohne Einschränkungen.

Weitere Kriterien in dieser Säule beschreiben die Nutzungsqualität. Bei diesen Kriterien ist nicht eindeutig feststellbar, inwiefern es sich um direkte oder indirekte Kriterien handelt. Zu den politischen Nachhaltigkeitszielen (Abschnitt 2.2.1) zählen z.B. eine bedarfsgerechte Wohnraumversorgung und Wahrung und Verbesserung der Lebensqualität. Auch weist *Lützkendorf* (2006, S. 70) darauf hin, dass „der Anspruch der Befriedigung menschlicher Bedürfnisse – insbesondere berechtigter Grundbedürfnisse – [...] ein fester Bestandteil des Konzepts und des Leitbilds nachhaltiger Entwicklung“ ist. Demnach kann die Nutzungsqualität als direktes Kriterium zu den genannten Schutzzielen interpretiert werden. Schwierig gestaltet sich gegebenenfalls die Abgrenzung, inwieweit die Bedürfnisbefriedigung die „berechtigten Grundbedürfnisse“ überschreiten darf, ohne das Nachhaltigkeitsprinzip der Suffizienz zu unterzulaufen. Das Erreichen einer hohen Nutzungsqualität hat jedoch auch indirekt eine Wirkung auf ökologische und ökonomische Schutzziele. Ein behagliches, gestalterisch ansprechendes, funktionales Gebäude kann seinen Zweck in besonderem Maße erfüllen. Es rechtfertigt damit überhaupt erst seine Erstellung und erhöht die Chance auf eine werthaltige und werterhaltende Nutzung.

## 2.6 Zusammenfassung

Das vorliegende Kapitel beschäftigte sich mit den Grundlagen des Nachhaltigen Bauens und dem aktuellen Stand der Nachhaltigkeitsbewertung.

Aus dem Leitsatz der nachhaltigen Entwicklung, wonach Gerechtigkeit bei der Befriedigung der Bedürfnisse heutiger und künftiger Generationen anzustreben ist, lassen sich konkrete Ziele ableiten. Vorgestellt wurden sowohl die von der Bundesregierung als auch die auf Ebene der EU formulierten Ziele, die für den Bausektor relevant sind.

Es wurde gezeigt, dass die Nachhaltigkeitsanalyse im Allgemeinen bzw. die Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken im Speziellen als Instrument zur Operationalisierung des Leitbilds aufzufassen ist. Die dabei beschrittenen unterschiedlichen Ansätze (normativ Top-Down oder problemorientiert Bottom-Up) stellen dabei keine unvereinbaren Gegenpole dar, sondern ergänzen sich.

In Abschnitt 2.4 wurde die Vielfalt der Bewertungskriterien herausgestellt. Aus der Menge der Kriterien sind für die vorliegende Arbeit vor allem die gebäudebezogenen Kriterien mit direktem Bezug zu den Nachhaltigkeitszielen hervorzuheben, deren Bewertung aus Lebenszyklusperspektive erfolgt. Hierunter fallen insbesondere die Kriterien der Ökobilanz und die Lebenszykluskosten. Es wurden die anerkannten Wirkungskategorien der Ökobilanz vorgestellt und noch bestehende Lücken bezüglich der ökologischen Ziele aufgezeigt. Die Bedeutung der Lebenszykluskosten wurde herausgestellt und die Verwendung der alternativen Indikatoren „Kapitalwert“ oder „Annuität“ diskutiert.

Die Analyse des aktuellen Stands der Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken zeigte, dass bezüglich der direkten Kriterien weitgehender Konsens herrscht, jedoch Unsicherheiten bestehen, wenn indirekte Kriterien zu quantifizieren sind. Ursache ist, dass ein methodischer Einbezug des unbekannten Lebenszyklus bislang nicht stattfindet. Hierfür soll in der vorliegenden Arbeit eine methodische Vorgehensweise entwickelt werden.



### 3 GRUNDLAGEN DER ENTSCHEIDUNGSTHEORIE

#### 3.1 Einführung

Der Gegenstand dieser Arbeit – die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden – lässt sich im Grunde auf ein Entscheidungsproblem zurückführen. Daher werden in diesem dritten Kapitel die Grundlagen der Entscheidungstheorie, soweit sie notwendig sind, vorgestellt.

In Abschnitt 3.2 wird zunächst eingeordnet, um welche Art von Entscheidungsproblem es sich handelt. In den folgenden Abschnitten werden dann bekannte Lösungsansätze aus der Literatur vorgestellt. Die vorgestellten Ansätze kommen teilweise bereits im Bauwesen zur Anwendung, stammen jedoch zum größeren Teil aus anderen Disziplinen, wie etwa den Wirtschaftswissenschaften. Ihre Übertragbarkeit auf die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden wird daher diskutiert. Im Hinblick auf die weitere Arbeit sind Entscheidungsverfahren für Multikriterienprobleme sowie Methoden für Entscheidungen unter Ungewissheit von Bedeutung.

#### 3.2 Nachhaltigkeitsbewertung als Entscheidungsproblem

Von einem Entscheidungsproblem ist allgemein die Rede, wenn ein Zielzustand angestrebt wird, zu dessen Erreichung unterschiedliche Alternativen zur Verfügung stehen. Die Notwendigkeit zur Entscheidung tritt auf, weil nicht alle Alternativen in gleicher Weise geeignet sind, das gewünschte Ziel zu erreichen, und die beste Alternative ausgewählt werden soll. Vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit stellt also auch jede Bauaufgabe ein Entscheidungsproblem dar. Verschiedene Bauwerksentwürfe stellen die Alternativen dar, unter welchen diejenige verwirklicht werden soll, die den Zielen einer nachhaltigen Entwicklung am besten entspricht.

Entscheidungsprobleme können nach *Grünig & Kühn* (2006, S. 11–16) hinsichtlich verschiedener Dimensionen unterschieden werden (vgl. Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Die Dimensionen von Entscheidungsproblemen und ihre Ausprägungen [Auszug nach Grünig & Kühn (2006, S. 12)]

Dimension	Ausprägungen		
Zahl der verfolgten Ziele	einwertig	mehrwertig	
Problemcharakter	Wahlproblem	Gestaltungsproblem	
Schwierigkeitsgrad	einfach	komplex	
Prognostizierbarkeit der Konsequenzen	mit Sicherheit prognostizierbare Konsequenzen	mehrere mögliche Konsequenzen mit prognostizierbaren Eintretenswahrscheinlichkeiten	mehrere mögliche Konsequenzen ohne prognostizierbare Eintretenswahrscheinlichkeiten

Bei einem einwertigen Entscheidungsproblem ist ein einzelnes Ziel für die Entscheidung ausschlaggebend, bei einem mehrwertigen Entscheidungsproblem existieren parallel mehrere Teilziele. Während bei Ausrichtung der Entscheidung an einem einzigen Ziel nur eine Bewertungsmethode für ein geeignetes Kriterium nötig ist, müssen bei mehrwertigen Entscheidungsproblemen mehrere Kriterien gleichzeitig berücksichtigt werden. Man spricht hier auch von einer multikriteriellen Entscheidung.

Bei einem Wahlproblem existiert eine beschränkte Anzahl an bekannten Alternativen, von denen die am besten geeignete auszuwählen ist. Bei einem Gestaltungsproblem ist die Zahl der Lösungsmöglichkeiten hingegen nahezu unbeschränkt. Der Weg zur besten Lösung ist nur schrittweise über die Bildung von Varianten möglich.

Man spricht von einem komplexen Entscheidungsproblem – im Gegensatz zu einem einfachen Entscheidungsproblem – wenn das Zielsystem nicht völlig präzise ist, das Problem verschiedene untereinander verbundene Aspekte besitzt, die zum Teil nicht quantifizierbar sind, und/oder es eine große Zahl von Lösungsmöglichkeiten gibt.

Schließlich werden noch Entscheidungen unter Sicherheit, unter Unsicherheit und unter Ungewissheit unterschieden. Bei einer Entscheidung unter Sicherheit sind die Konsequenzen bekannt bzw. vorhersagbar. Bei einer Entscheidung unter Unsicherheit sind verschiedene Konsequenzen möglich, deren Eintrittswahrscheinlichkeit jedoch angegeben werden kann. Eine Entscheidung unter Ungewissheit liegt hingegen vor, wenn die Eintrittswahrscheinlichkeiten der möglichen Konsequenzen unbekannt sind. Entscheidungen unter Unsicherheit oder Ungewissheit erfordern die Verwendung von Szenarien [Grünig & Kühn (2006, S. 84)].

Die Nachhaltigkeitsbeurteilung wird dazu verwendet, ein Gebäude hinsichtlich seines Beitrags zu einer nachhaltigen Entwicklung zu optimieren. Es handelt es sich daher in der Regel um ein komplexes Gestaltungsproblem mit mehrdimensionalem Zielsystem. Das Gestaltungsproblem wird dabei durch die iterative Variantenplanung in mehrere Wahlprobleme zerlegt. Vom ersten Entwurf bis zur Detailplanung wird eine begrenzte Anzahl von Alternativen in Erwägung gezogen. Die Bewertungsaufgabe besteht jeweils darin, diese Menge der Alternativen zu reduzieren (sog. Screening oder Vorauswahl) und die verbleibenden Alternativen in eine Rangfolge zu bringen oder direkt die beste Alternative zu bestimmen. Bei der Beurteilung von Gebäuden sind die Konsequenzen in Teilen prognostizierbar, in anderen Teilen jedoch ungewiss oder zumindest unsicher, so dass genau genommen eine Entscheidung unter Ungewissheit bzw. Unsicherheit vorliegt. Bestehende Bewertungssysteme zur Nachhaltigkeit von Gebäuden erfassen meist nicht die gesamte Komplexität der Entscheidung und reduzieren die Betrachtung auf eine Entscheidungssituation unter Sicherheit oder auf ein einwertiges Problem.

Im Folgenden Abschnitt 3.3 wird zunächst gezeigt, wie von der Bewertung einzelner Kriterien zu einer Multikriterienbewertung übergegangen werden kann. In Abschnitt 3.4 wird die Betrachtung danach auf die Situation unter Ungewissheit/Unsicherheit ausgedehnt, bevor in Kapitel 4 die Entwicklung eines neuen Verfahrens vorgestellt wird.

### **3.3 Entscheidungsverfahren für Multikriterienprobleme**

#### **3.3.1 Überblick**

Liegt ein Entscheidungsproblem vor, so kommen verschiedene Vorgehensweisen infrage. Neben der intuitiven Auswahl einer Lösung, dem Rückgriff auf bewährte Lösungen der Vergangenheit oder ähnliche nicht formalisierte Verfahren, werden in der Literatur strukturierte Entscheidungsverfahren beschrieben [Grünig & Kühn (2006, S. 8, 76-81), Norris & Marshall (1995, S. 6-13)]. Der prinzipielle Ablauf dieser Entscheidungsverfahren ist im Wesentlichen identisch:

Zunächst ist die Zielstellung in Einzelziele aufzuteilen. Für die Einzelziele sind Kriterien zu wählen, anhand deren jede der Alternativen bewertet werden kann. In der Regel ergibt sich aus der Natur der Kriterien für jedes Kriterium eine andere Bewertungsskala.

Je nach Entscheidungsverfahren können nominale, ordinale oder kardinale Merkmale für die Bewertung infrage kommen. Bei einigen Verfahren ist es notwendig, dass alle Kriterien mit derselben Bewertungsskala beurteilt werden, was in der Regel eine Normierung oder Umrechnung der einzelnen Bewertungsskalen erforderlich macht.

#### EXKURS:

Man unterscheidet zwischen nominalen Merkmalen und auf ordinalen oder kardinalen Skalen messbaren Merkmalen. (Beispiele hierfür sind in Anhang B dargestellt.)

Bei **nominalen Merkmalen** kann lediglich festgestellt werden, ob eine bestimmte Eigenschaft vorliegt oder nicht oder in welcher Form eine Eigenschaft vorliegt. Es kann jedoch keine Rangfolge gebildet werden. Im Rahmen der Alternativenbewertung sind nominale Merkmale nur zur Vorauswahl von Alternativen tauglich. Sofern für das Merkmal eine Anforderung vorgegeben ist, kann zwischen „erfüllt“ und „nicht erfüllt“ unterschieden werden. Das Kriterium wird als zweiwertiges Kriterium bezeichnet.

Bei **ordinalen Merkmalen** wird jede Merkmalsausprägung genau einer Kategorie zugeordnet. Auf der Ordinalskala lassen sich die Kategorien in eine Rangordnung bringen, allerdings enthält die Rangfolge keine Aussage über die Abstände zwischen den einzelnen Kategorien. Es handelt sich bloß um ein sogenanntes Ranking. Ordinale Merkmale können ebenfalls zur Vorauswahl von Alternativen verwendet werden, indem eine bestimmte Mindestkategorie vorgegeben wird. Zudem erlauben sie eine ordinale Rangordnung von Alternativen. Ein ordinale Kriterium ist ein mehrwertiges Kriterium, das eine endliche Zahl diskreter Werte annehmen kann.

Bei **kardinalen Merkmalen** sind die Merkmalsausprägungen metrisch, also quantitativ bestimmbar. Auf einer Kardinalskala (auch Intervallskala) können Rangunterschiede und Abstände zwischen Werten gemessen und in ein Verhältnis zueinander gesetzt werden. Eine Steigerung der Kardinalskala stellt die Rationalskala (auch Verhältnisskala) dar. Sie besitzt neben den Eigenschaften der Kardinalskala einen absoluten Nullpunkt, so dass nicht nur Abstände in ein Verhältnis zueinander gesetzt werden können, sondern auch Verhältnisse zwischen den Alternativen festgestellt werden können. Kardinale Merkmale können sowohl zur Vorauswahl von Alternativen als auch zur Rangordnung und absoluten Bewertung verwendet werden.

Wird den Kategorien eines ordinalen Merkmals ein Zahlenwert zugeordnet, der wie ein kardinales Merkmal behandelt wird, so spricht man auch von einem **quasi-kardinalen Merkmal** [Schneeweiß (1992, S. 40–48)]. Dieses Vorgehen wird oft als Rating bezeichnet. Ein typisches Beispiel sind Schulnoten, deren Bedeutung („sehr gut“, „gut“, „befriedigend“, „ausreichend“, „mangelhaft“, „ungenügend“) per se keine Aussage darüber enthält, wie viel besser eine Kategorie gegenüber einer anderen ist. Durch das Gleichsetzen der Kategorien mit einer Zahl, dem sog. Rating, (1, 2, usw.) wird nun ein gleichgroßer Abstand zwischen den Kategorien suggeriert. Mit den Noten können dann mathematische Operationen (z.B. Klassendurchschnitt) durchgeführt werden. Quasi-kardinale Merkmale finden dort Verwendung, wo das Rechenverfahren kardinale Merkmale erfordert, jedoch keine metrischen Kriterien vorliegen. Bei ihrer Verwendung sollte man sich stets bewusst sein, dass die Voraussetzung der Kardinalität im strengen Sinne nicht erfüllt ist.

Die Kriterien sind bei jedem Entscheidungsverfahren nach einem bestimmten System zu gliedern. Das Gliederungssystem kann mehrere Hierarchieebenen enthalten oder nach Aufwands- und Nutzenkriterien unterteilen. Zumeist ist mit der Gliederung der Kriterien auch eine Wichtung derselben vorzunehmen, wobei sich die Verfahren zum Teil darin unterscheiden, mit welcher Methode die Wichtungen festgelegt werden.

Im eigentlichen Bewertungsschritt sind sodann für alle Alternativen die Einzelkriterien zu bewerten. Die Bewertungsergebnisse werden in der sogenannten Ergebnismatrix dargestellt mit den Alternativen in Reihen und den Kriterien in Spalten (vgl. Abbildung 3-1). Bei den in diesem Abschnitt vorgestellten Entscheidungsverfahren ist es in der Regel notwendig, dass zu jeder Alternative  $i$  und jedem Kriterium  $j$  eine Bewertung  $x_{ij}$  vorliegt, das heißt dass die Ergebnismatrix vollständig gefüllt ist.

	Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium j	Kriterium n
Alternative 1	$x_{11}$	$x_{12}$	...	...
Alternative 2	$x_{21}$	$x_{22}$	...	...
Alternative i	...	...	$x_{ij}$	...
Alternative m	...	...	...	$x_{mn}$

Abbildung 3-1: Ergebnismatrix mit Ergebnissen  $x_{ij}$

Schließlich erfolgt die Auswertung der Ergebnismatrix nach der für das Entscheidungsverfahren typischen Methode. Ergebnis der Auswertung kann die Angabe der besten Alternative oder eine Ordnung der Alternativen sein.

Prinzipiell gut eignen sich Entscheidungsverfahren, die eine kompensatorische Bewertung ermöglichen, das heißt dass schlechte Bewertungen hinsichtlich eines Kriteriums mit guten Bewertungen hinsichtlich eines anderen Kriteriums verrechnet werden [Götze & Bloech (2002, S. 177)]. Nicht-kompensatorische Verfahren beinhalten entweder die Vernachlässigung von Kriterien oder führen nur bei trivialen Entscheidungsmatrizen mit einer (einzigen) dominanten Alternative zu einer Lösung. Dieser Fall ist in der Realität bei komplexen Systemen selten gegeben. Einige nicht-kompensatorische Verfahren können jedoch zur Vorauswahl zulässiger Alternativen (Screening) verwendet werden (vgl. den folgenden Abschnitt 3.3.2).

Die Zahl der Entscheidungsverfahren ist vielfältig. Im Folgenden werden nur solche Verfahren betrachtet, die eine Ordnung von Alternativen ermöglichen. Sie alle implizieren,



dass der Entscheidungsträger prinzipiell in der Lage ist, die Alternativen gemäß seinen Präferenzvorstellungen in eine schwache Ordnung zu bringen. Er muss bereit und fähig sein, hinsichtlich zweier Ergebnisse seine Präferenz ( $a \succ b$  oder  $a \prec b$ ) bzw. Indifferenz ( $a \sim b$ ) anzugeben. Die Ablehnung des Vergleichs ist nicht gestattet. Die Präferenzrelation muss vollständig und transitiv sein<sup>14</sup>, dann lassen sich alle Alternativen in eine eindeutige Rangfolge bringen, wobei gleichwertige Alternativen denselben Rang einnehmen.

Daneben gibt es Outranking-Verfahren, auch Prävalenz-Verfahren genannt, wie z.B. Electre oder Promethee [Bamberg, Coenenberg & Krapp (2008, S. 62–63), Götze (2008, S. 217–229)]. Zu deren Eigenheiten gehört, dass Alternativen als einander unvergleichbar eingestuft werden können. Es können dann zwar Klassen von Alternativen gebildet werden, wobei alle Alternativen der höheren Klasse denjenigen der niedrigeren Klasse vorgezogen werden. Innerhalb einer Klasse sind die Alternativen jedoch unvergleichbar (nicht gleichwertig!). Die Verfahren führen nur in Sonderfällen zur Identifikation einer besten Alternative und werden daher nicht weiter betrachtet.

Die prinzipiell zur vollständigen Ordnung von Alternativen geeigneten Verfahren werden im Folgenden kurz vorgestellt. Ferner wird eine Einschätzung bezüglich ihrer Eignung für das Problem der Nachhaltigkeitsbewertung gegeben. Dabei wird auf drei verschiedene Gruppen von Verfahren eingegangen. Die erste Gruppe beruht auf dem Konzept eines Gesamtnutzens für jede Alternative. Hierzu zählen das Allgemeine Verfahren nach der multi-attributiven Nutzentheorie, die Nutzwertanalyse und der analytisch-hierarchische Prozess. Eine andere Art von Verfahren geht von angestrebten Zielvorgaben aus (TOPSIS-Methode) und die dritte Gruppe beurteilt die Alternativen nach ihrer Effizienz. Zu letzterer zählen die Kosten-Nutzen-Analyse, die Kosten-Wirksamkeits-Analyse und das Preis-Leistungsmodell.

#### 3.3.2 Voruntersuchungen

Bevor ein bestimmtes Entscheidungsverfahren angewendet wird, sollte die Entscheidungsmatrix näher untersucht werden, um gegebenenfalls Alternativen von der weiteren Betrachtung auszuschließen (sog. Screening).

Ist eine Alternative einer anderen Alternative in jedem Kriterium mindestens ebenbürtig und in zumindest einem Kriterium überlegen, so dominiert diese Alternative die andere

---

<sup>14</sup> Vollständigkeit liegt vor, wenn für *jedes* Paar von Ergebnissen  $a, b$  gilt:  $a \succ b \vee a \prec b \vee a \sim b$ . Transitivität liegt vor, wenn für drei beliebige Ergebnisse  $a, b, c$  gilt:  $a \succ b \wedge b \succ c \Rightarrow a \succ c$  sowie  $a \sim b \wedge b \sim c \Rightarrow a \sim c$

[Bamberg, Coenenberg & Krapp (2008, S. 48)].<sup>15</sup> Die Alternative, die dominiert wird, bezeichnet man als ineffizient. Sie kommt als Lösung des Entscheidungsproblems nicht infrage. Wird eine Alternative von keiner anderen dominiert, so bezeichnet man diese als effizient. Vor der Anwendung weiterer Entscheidungsverfahren sollten ineffiziente Alternativen aussortiert werden [Bamberg, Coenenberg & Krapp (2008, S. 50)]. Ferner kann die Anzahl der zu untersuchenden Alternativen weiter eingeschränkt werden, indem solche, die bestimmte Mindestanforderungen nicht einhalten, aussortiert werden [Norris & Marshall (1995, S. 9)].

Die Untersuchung auf Dominanz bzw. Effizienz und das Screening anhand von Mindestanforderungen sind generelle Vorgehensweisen, die auch in der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden empfehlenswert sind. Sie führen zwar nur in Ausnahmefällen direkt zu einer Lösung, grenzen jedoch die Zahl der Alternativen ein und verringern damit den nachfolgenden Arbeitsaufwand. Bleibt beim Screening keine Alternative übrig, so müssen entweder weitere Alternativen zur Lösung des Problems gesucht werden, oder das Niveau der Mindestanforderungen muss überdacht werden. Da manche Entscheidungsverfahren auch ineffiziente Alternativen als Lösung produzieren können, ist das Aussortieren ineffizienter Alternativen in jedem Fall empfehlenswert.

#### 3.3.3 Allgemeines Verfahren nach der multi-attributiven Nutzentheorie

Die multi-attributive Nutzentheorie (Multi-Attribute Utility Theory, MAUT) wurde in den 1960er und 1970er Jahren formuliert [Dyer, Fishburn, et al. (1992, S. 646)]. Sie stellt eine Logik mit fundiertem mathematischem Hintergrund dar, deren Ausgangsgedanke darin besteht, dass die Präferenzen des Entscheiders sich durch eine Nutzenfunktion  $U(A): \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$  abbilden lassen. Diese Funktion ordnet einer Alternative A einen reellen Zahlenwert zu, der für den Nutzen U der Alternative steht. Ist die Nutzenfunktion bekannt, so lässt sich das Entscheidungsproblem auf ein Maximierungsproblem der Nutzenfunktion zurückführen.<sup>16</sup> Die Ermittlung der Nutzenfunktion stellt damit das Kernproblem der Entscheidung dar. Unter bestimmten Voraussetzungen<sup>17</sup> und für den Sonderfall der Nutzenunabhängigkeit bezüglich aller Kriterien lässt sich der Nutzen U einer Alternative in Teilnutzen u für jedes Kriterium x aufspalten. Die Nutzenfunktion U lässt sich dann in ihrer einfachsten und gebräuchlichsten Form als Summe von Nutzenfunktionen u

---

<sup>15</sup> Für den trivialen Fall, dass eine Alternative existiert, die alle anderen dominiert, stellt diese die Lösung des Entscheidungsproblems dar.

<sup>16</sup> s. Keeney & Raiffa (1976), Bamberg, Coenenberg & Krapp (2008, S. 32–36), Schneeweiß (1992)

<sup>17</sup> s. Laux (2007, S. 94)

darstellen. Die Funktion  $u_j$  ordnet dabei einem Kriterium  $x_j$  einer Alternative einen anteiligen Nutzen am Gesamtnutzen der Alternative zu.

$$U(A) = \sum_j u_j(x_j) \quad \text{Gl. 3-1}$$

Die einzelnen Nutzenfunktionen  $u_j$  sind empirisch durch Befragen des Entscheidungsträgers zu bestimmen. Im paarweisen Vergleich von Kriterien muss dieser angeben, welchen Betrag der einen Größe er aufzugeben bereit ist, wenn er stattdessen einen bestimmten Betrag der anderen Größe erhält. Aus den Substitutionsraten lassen sich die Nutzenfunktionen konstruieren und gegeneinander skalieren. Ergebnis ist eine kardinale Nutzenfunktion, die nicht nur eine Rangfolge der Alternativen erzeugt, sondern auch den Abstand zwischen Alternativen messbar macht.

So elegant Verfahren nach der multi-attributiven Nutzentheorie auch sind, scheinen sie bislang keinen Eingang in das im Bauwesen gefunden zu haben. Die Schwierigkeit liegt zuvorderst in der praktischen Ermittlung der Substitutionsraten bei Kriterien, die sich dem Erfahrungsschatz der Bauschaffenden entziehen. Um welchen Betrag müssten sich die Lebenszykluskosten reduzieren, damit eine Erhöhung der Treibhausgasemissionen um 50 CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup> akzeptiert werden kann? Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass diese Verfahren für die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden nicht praktikabel sind. Hinzu kommt, dass eine kardinale Nutzenfunktion auch ausschließlich kardinal messbare Kriterien erfordert. Kommen ordinale Kriterien hinzu, so bietet sich stattdessen die Nutzwertanalyse als Verfahren an [Schneeweiß (1992, S. 156)].

#### 3.3.4 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse nach Zangemeister (1976) erlaubt die Ordnung verschiedener Alternativen, indem jeder Alternative ein Nutzwert (Gesamtnutzwert) zugeordnet wird. Dieser erlaubt die Rangordnung der Alternativen, wobei die Alternative mit dem höchsten Nutzwert die beste darstellt.

Die Bewertung der einzelnen Kriterien ist hierzu auf ein und dieselbe Skala für den Nutzwert zu transformieren. Der Nutzwert gibt dabei den Erfüllungsgrad des Kriteriums von „voll“ bis „unzureichend“ wieder.

Es ist eine Wichtung der Kriterien erforderlich, die ohne eine vorgegebene systematische Vorgehensweise festgelegt wird. Bedingung ist, dass alle Wichtungen zusammen den Wert eins ergeben. Dieses Vorgehen ist bei einer größeren Zahl von Kriterien nicht mehr praktisch handhabbar. Dem kann durch Gliederung der Kriterien auf mehreren hierarchischen Ebenen und Wichtung auf jeder Ebene entgegengewirkt werden.

Zur Ermittlung des Gesamtnutzwerts wird die gewichtete Summe der Nutzwerte gebildet.

$$NW = \sum_j x_j \cdot w_j \quad \text{Gl. 3-2}$$

mit  $NW$  = Gesamtnutzwert der Alternative

$x_j$  = Nutzwert der Alternative hinsichtlich des Kriteriums  $j$

$w_j$  = Wichtung des Kriteriums  $j$

Die Nutzwertanalyse ist aufgrund der leicht verständlichen Methodik und des geringen mathematischen Schwierigkeitsgrads leicht anwendbar, weit verbreitet und gut akzeptiert. Allerdings ist sie theoretisch weniger gut fundiert als die allgemeine multi-attributive Nutzentheorie. Häufiger Kritikpunkt ist die wenig systematisierte Wahl der Wichtungen für die Kriterien [Schneeweiß (1992, S. 148)]. Hierzu bemängelt *Lillich* (1992, S. 170), "numerische Werte gehen in einem Bedeutungsmaße in die Aggregation ein, wie es vom Entscheidungsträger nicht beabsichtigt oder festlegbar ist."

Die Nutzwertanalyse eignet sich generell zur Nachhaltigkeitsbewertung für Gebäude. Voraussetzung ist, dass die Kriterien hierarchisch nach Zielen und Unterzielen geordnet werden, wofür sich die drei (oder mehr) Säulen der Nachhaltigkeit anbieten. Die Indikatoren können für jedes Kriterium unterschiedlich sein, so dass jedes Kriterium seine sachlogisch zutreffende Messgröße behalten kann, z.B. Euro für Kosten und kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent für Treibhausemissionen. Die Notwendigkeit gleichnamiger Messgrößen entfällt. Weitere Voraussetzung ist jedoch, dass jedes Kriterium in einen Zielerfüllungsgrad überführt wird. Hierzu muss eine Zielerfüllungsfunktion definiert werden, die den Indikator auf den Zielerfüllungsgrad abbildet. Es muss also eine Vorstellung darüber vorliegen, welcher Wert für ein Kriterium einen erstrebenswerten Zustand darstellt (volle Zielerfüllung), bei welchem Wert kein Nutzen vorhanden ist (unzureichende Zielerfüllung) und wie die Funktion zwischen diesen Werten verläuft (Treppenfunktion, linear, nichtlinear). Es ist einsichtig, dass dies einen gewissen Erfahrungsschatz voraussetzt, der Kriterien wie z.B. Treibhausgasemissionen fehlt. Die freie Wahl der Gewichtung kann im Rahmen der Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden als Vorteil betrachtet werden, da sie die Anpassung der Bewertung an die Eigenheiten des Projekts und die individuellen Zielvorstellungen des Anwenders erlaubt. Gleichzeitig liegt hierin die Gefahr, das Ergebnis bewusst oder unbewusst zu manipulieren.

Ein prominentes Beispiel für die Verwendung der Nutzwertanalyse stellt das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude BNB [BMVBS (2010)] dar.

#### 3.3.5 Analytisch-hierarchischer Prozess

Der analytisch-hierarchische Prozess (AHP) nach *Saaty* (1980) stellt eine Weiterentwicklung der Nutzwertanalyse dar, die oft kritisierte Schwächen der Nutzwertanalyse aufheben soll. Auch der AHP erlaubt die Ordnung verschiedener Alternativen, sowie die Angabe der besten Alternative nach dem Maximalprinzip.

Er formalisiert das Aufstellen des hierarchischen Zielsystems, die Wichtung der Kriterien und die Bewertung der Alternativen hinsichtlich eines Kriteriums. Die Besonderheit besteht im Wesentlichen in der speziellen systematischen Vorgehensweise, bei der Kriterien stets paarweise miteinander verglichen werden. Es wird beurteilt, wie die Wichtigkeit des einen Kriteriums gegenüber dem anderen Kriterium eingeschätzt wird. Dies wird in Zahlen auf einer Skala von 1 bis 9 ausgedrückt (vgl. Tabelle 3-2). Aus der dadurch entstandenen Matrix wird die Wichtung der Kriterien über den Eigenvektor mit dem größten Eigenwert berechnet. Zusätzlich kann angegeben werden, wie konsistent die angegebenen Wichtungen sind. Ein Beispiel hierzu findet sich in Anhang E.

Tabelle 3-2: Neun-Punkte-Skala [nach Götze & Bloech (2002, S. 190)]

Skalenwert	Definition	Interpretation
1	Gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element.
3	Etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	Erheblich größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
7	Sehr viel größere Bedeutung	Die sehr viel größere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.
9	Absolut dominierend	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte	

Ebenso wird bei der Bewertung der Alternativen hinsichtlich eines Kriteriums vorgegangen. Im paarweisen Vergleich wird auf der oben genannten Skala angegeben, wieviel besser Alternative A zur Erfüllung des betrachteten Kriteriums beiträgt als Alternative B. Gegenüber der Nutzwertanalyse ist es bei der Beurteilung der Kriterien nicht notwendig, einen Zielerfüllungsgrad anzugeben. Dieser wird aus der Matrix der Bewertungen untereinander errechnet.

Das weitere Vorgehen entspricht der Nutzwertanalyse. Durch Bildung der gewichteten Summe über alle Gewichtungsebenen wird für jede Alternative das Gesamtergebnis ermittelt und die beste Alternative nach dem Maximalprinzip ausgewählt.

Der Rechenaufwand für den AHP ist gegenüber der Nutzwertanalyse erhöht, dies stellt jedoch bei EDV-gestützter Bewertung keinen relevanten Nachteil dar. Vielmehr ist der Aufwand zur Ermittlung der paarweisen Vergleiche als hoch anzusehen. Dieser steigt stark mit der Anzahl der auf einer Ebene zu vergleichenden Elemente an.<sup>18</sup> Die Beurteilung auf der Neun-Punkte-Skala erleichtert den Vergleich von Attributen, stellt jedoch auch eine Fehlerquelle dar. Einerseits ist „fraglich, inwieweit ein Entscheidungsträger zwischen den mit der Neun-Punkte-Skala verbundenen Aussagen wie "erheblich größere Bedeutung" (Skalenwert 5) sowie "sehr viel größere Bedeutung" (Skalenwert 7) differenzieren und dabei eventuell auch noch Zwischenwerte einbeziehen kann“ [Götze & Bloech (2002, S. 203)], andererseits kann die Skala zu Inkonsistenzen führen.

Für die Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden ist der analytisch-hierarchische Prozess grundsätzlich anwendbar. Da jedoch die Bewertung der Alternativen auf dem gegenseitigen Vergleich beruht, ist die Bewertung einer einzelnen Alternative nicht möglich. Der Vorschlag, hilfsweise eine Null-Alternative „Nichts-Tun“ zum Vergleich heranzuziehen, ist beim Planungsentwurf eines Gebäudes nicht sinnvoll [Norris & Marshall (1995, S. 41)]. Zudem ist das Verfahren nicht stabil, insofern als sich bei Hinzu- oder Wegnahme einer Alternative die Rangfolge der Alternativen ändern kann [Götze & Bloech (2002, S. 203–204)]. Das Ergebnis hat also nur im Rahmen der betrachteten Alternativen eine Bedeutung und stellt keinen Absolutwert für den Nutzen dar. Die formalisierte Bestimmung der Wichtung auf den einzelnen Hierarchieebenen stellt hingegen einen Vorteil gegenüber der Nutzwertanalyse dar, da sie eine willkürliche Festlegung der Gewichte umgeht. Der Entscheider wird gezwungen, sich im Detail mit seinen Zielvorstellungen auseinanderzusetzen. Inkonsistenzen der Art „A erscheint mir wichtiger als B, B wichtiger als C und C so wichtig wie A“ werden aufgedeckt. Es bietet sich an, diese Elemente des AHP mit anderen Verfahren zu kombinieren.

---

<sup>18</sup> Für  $n$  Elemente beträgt die Zahl der zu führenden paarweisen Vergleiche  $\binom{n}{2} = \frac{n \cdot (n-1)}{2}$ . Bei 5 Elementen sind z. B. 10 Vergleiche nötig, bei 20 Elementen wären es 190 Vergleiche.

#### 3.3.6 TOPSIS-Methode

Diese Methode zählt zur Gruppe der Verfahren nach dem Goal-Programming-Ansatz. Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass es für jedes Kriterium eine angestrebte Größe gibt. Die Kombination der Zielgrößen muss dabei in der Realität nicht unbedingt erreichbar sein. Es soll nur diejenige Alternative gefunden werden, die dieser Idealvorstellung am nächsten kommt, also die Zielgrößen am wenigsten über- und unterschreitet. Die beste Alternative wird anhand der Summe der Abweichungen von der Ideallösung nach dem Minimalprinzip ausgewählt. In der betriebswirtschaftlichen Praxis, wo häufig Zielvorgaben (Punktziele, Budgets) existieren, ist dieser Ansatz naheliegend [Bamberg, Coenenberg & Krapp (2008, S. 56)]. Für die Nachhaltigkeitsbewertung stellt jedoch die Vorgabe von Planzahlen für einzelne Kriterien eine Schwierigkeit dar.

Die TOPSIS-Methode (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) nach *Hwang & Yoon* (1981) stellt eine Sonderform dieses Ansatzes dar, bei dem die Zielgrößen aus der Entscheidungsmatrix selbst abgeleitet werden. Die jeweils besten Kriterienergebnisse über alle Alternativen ergeben eine hypothetische Positiv-Ideal-Lösung, die schlechtesten eine Negativ-Ideal-Lösung. Die Alternativen werden dann nach ihrem Euklidischen Abstand zur Positiv- bzw. Negativ-Ideal-Lösung bewertet. Die Alternative mit dem geringsten Abstand zur Positiv-Ideal-Lösung bezogen auf den Gesamtabstand zu Positiv- und Negativ-Ideal-Lösung stellt die beste Alternative dar.

Für die Bewertung der Einzelkriterien ist eine kardinale Skala erforderlich, worin eine Einschränkung der Einsatzmöglichkeiten für TOPSIS zu sehen ist [Peters & Zelewski (2007, S. 15)]. Bei unterschiedlichen Skalen für die Kriterien müssen diese normiert werden. Zusätzlich ist eine Wichtung der Kriterien notwendig. Für diese Teilschritte können Methoden z.B. des analytisch-hierarchischen Prozesses oder der multi-attributiven Nutzentheorie eingesetzt werden.

Für die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden erscheint TOPSIS grundsätzlich geeignet. Die Methode erlaubt die Berücksichtigung von unterschiedlichen Kriterien und deren Wichtung relativ zur Bedeutung im Gesamtkontext. Auf die Definition eines Zielerfüllungsgrads oder die Angabe einer angestrebten Zielgröße kann verzichtet werden, was bei Kriterien mit geringem Erfahrungsschatz einen Vorteil gegenüber der Nutzwertanalyse darstellt. Andererseits ist zu bedenken, dass das Ergebnis nur im Rahmen der betrachteten Alternativen eine Aussagekraft besitzt. Da die Zielgrößen allein durch die in Betracht gezogenen Alternativen bestimmt werden, ist nicht sichergestellt, dass diese das tatsächlich angestrebte Niveau im Sinne einer Nachhaltigen Entwicklung darstellen. Bewegen sich alle betrachteten Alternativen bezüglich eines Kriteriums auf dem gleichen niedrigen Niveau, so wird ein bei absoluter Betrachtung unzureichendes Ergebnis aufgrund seiner Nähe zum besten vorhandenen Wert als sehr gut eingestuft. Existieren also Zielvorstellungen hinsichtlich bestimmter Kriterien, so ist die TOPSIS-

Methode in ihrer ursprünglichen Form nicht empfehlenswert. Eine Modifikation dahingehend, dass für Kriterien mit objektiven Zielwerten diese für die Formulierung der hypothetischen Ideal-Lösung vorgegeben werden, erscheint naheliegend.

#### **3.3.7 Kosten-Nutzen-Analyse**

Die Kosten-Nutzen-Analyse zählt zu den Effizienzwertmethoden. Diese beruhen auf dem Wirtschaftlichkeitsprinzip. Der beste Effizienzwert ergibt sich beim geringsten Verhältnis von Aufwand zu Nutzen. Die Methoden erlauben sowohl die Ermittlung einer kardinalen Ordnung als auch die Angabe einer besten Alternative.

Bei der Kosten-Nutzen-Analyse werden die verschiedenen Zielgrößen gleichnamig gemacht, indem auch nicht-monetäre Größen monetär bewertet werden, und jeweils für Kosten und Nutzen addiert. Da alle Kriterien in derselben monetären Einheit gemessen werden, ist keine Wichtung notwendig. Die Bewertung einer Variante ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Kosten und Nutzen. Die beste Variante wird nach dem Minimalprinzip bestimmt.

Bei der Ermittlung des Nutzens und der Kosten sind in der Regel auch Opportunitätskosten sowie der Effekt der Diskontierung zu berücksichtigen. Die Schwierigkeiten bestehen darin, den Nutzen bei intangiblen (nicht direkt messbaren) Kriterien zu monetarisieren und externe Kosten zu internalisieren. Nicht monetär bewertbare Kriterien können nur im Nachgang in die Beurteilung der Alternativen einfließen.

Kosten-Nutzen-Analysen werden in Deutschland bei Maßnahmen der öffentlichen Hand zur Prüfung der Gesamtwirtschaftlichkeit als Vorbereitung der politischen Entscheidung angewendet. Ein Projekt wird als volkswirtschaftlich vernünftig angesehen, wenn der erreichbare zusätzliche Nutzen die damit verbundenen zusätzlichen Kosten übersteigt [Worch (1996, S. 71)]. Die Kosten-Nutzen-Analyse kommt vor allem bei Infrastrukturvorhaben zum Einsatz, z.B. bei Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für Straßen nach *FGSV* (1997). Dabei werden auch externe volkswirtschaftliche Kosten und Nutzen, wie z.B. Zeitersparnis, Lärmbelastung und Klimaschäden betrachtet.

Durch Berücksichtigung externer Kosten bietet das Verfahren prinzipiell die Möglichkeit, Nachhaltigkeitsaspekte zu adressieren. Bei vollständiger Erfassung aller Aspekte wäre sogar eine Aussage darüber möglich, ob ein Projekt absolut vorteilhaft ist. Auf die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden ist das Verfahren derzeit jedoch nicht anwendbar, da für die Mehrzahl der gebäudebezogenen Kriterien keine Kostenansätze vorliegen. Auch ist grundsätzlich infrage zu stellen, ob sich alle Nachhaltigkeitsaspekte vollständig monetarisieren lassen.



### 3.3.8 Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Die Kosten-Wirksamkeits-Analyse [Schulte-Zurhausen (2002), Aberle (2009, S. 476)] ist eine Effizienzwertmethode, die nicht erfordert, dass alle Kriterien monetär bewertet werden. Der Aufwandswert wird monetär als Kosten, der Nutzenwert nicht-monetär als Wirksamkeit bestimmt. Letzterer kann analog zur Nutzwertanalyse nach einem gewichteten Punktesystem bestimmt werden. Als beste Alternative wird diejenige mit dem kleinsten Kosten-Wirksamkeits-Quotienten betrachtet.

Die Methode eignet sich, wenn die Kosten für die Entscheidung separat ausgewiesen werden sollen und der Nutzen nicht in monetären Einheiten angegeben werden kann.

Auf die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden ist die Methode damit übertragbar. Auf der Kostenseite bietet es sich an, allein die Lebenszykluskosten zu betrachten, um das Problem der Quantifizierung externer Kosten zu umgehen. Auf der Nutzenseite werden alle übrigen Kriterien zusammengefasst. Diese sind dann durchgängig als Nutzen zu formulieren, z.B. als vermiedene Emissionen anstelle von Umweltbelastungen. Die Bewertung unterscheidet sich damit grundlegend von den oben vorgestellten Verfahren, da die Lebenszykluskosten von der Wichtung der Kriterien ausgenommen sind und bezüglich der Lebenszykluskosten kein Minimierungsziel mehr besteht. Niedrige Lebenszykluskosten können bei niedrigem Nutzen schlechter zu bewerten sein als höhere Lebenszykluskosten. Das Verfahren stellt den oft reklamierten Gegensatz zwischen Kosten und sonstigen Nachhaltigkeitskriterien heraus, anstatt die Lebenszykluskosten in die Nachhaltigkeitsaspekte zu integrieren. Gleichzeitig wird durch die Betrachtung der Lebenszykluskosten anstelle der reinen Erstinvestition der langfristigen Verantwortung Rechnung getragen. Hegt der Entscheidungsträger Skepsis gegenüber dem Drei-Säulen-Modell, so kann die Verwendung dieses Ansatzes hilfreich sein. Allerdings kann anhand des Kosten-Wirksamkeitsquotienten nur eine ordinale Rangfolge von Alternativen hergestellt werden.

### 3.3.9 Preis-Leistungsmodell

Bei Anwendung des Preis-Leistungsmodells [Grob (2003)] kann aus mehreren Varianten diejenige ausgewählt werden, die in den Augen des Bewertenden das beste Preis-Leistungsverhältnis widerspiegelt. Die Bewertung beruht auf einer Kombination des Selektionsprinzips und des Minimalprinzips.

Alle monetären Größen (Auszahlungen und Einzahlungen) behalten dabei ihre monetäre Dimension und werden unter Berücksichtigung der Diskontierung zu einem Preis aggregiert.

Jedes nicht-monetäre Kriterium behält ebenfalls seine (kardinale, ordinale oder nominale) Dimension und muss mit einer Mindestanforderung belegt werden. Diese Kriteriengruppe

erfasst die Leistung der Alternative durch die Gegenüberstellung von Anforderungen und deren Erfüllung.

Im ersten Schritt der Bewertung erfolgt die Auswahl der zulässigen Alternativen anhand der erforderlichen Mindestleistung. Grundprinzip hierbei ist, dass Untererfüllungen zum Ausschluss der Alternative führen, Übererfüllungen hingegen nicht honoriert werden.

Im zweiten Schritt wird aus allen zulässigen Alternativen nach dem Minimalprinzip diejenige mit dem geringsten Preis als beste Alternative ausgewählt.

In einer zweiten Phase überprüft der Bewertende das Ergebnis, indem er das Anspruchsniveau korrigiert. Dabei wird entweder untersucht, ob es sich lohnt, zugunsten eines preisgünstigeren Angebots einige Leistungsansprüche zu reduzieren, oder es wird untersucht, ob ein höherer Preis bei angehobenen Leistungsansprüchen gerechtfertigt ist. Die Überprüfungsphase obliegt der Intuition des Bewertenden, der in einem iterativen Prozess solange die Schritte der Anspruchsdefinition, Selektion der Varianten und Auswahl nach dem Minimalprinzip durchführt, bis das seiner Meinung nach beste Preis-Leistungsverhältnis erreicht ist.

Die Methode ist nicht anwendbar, wenn der Bewertende aufgrund mangelnder Erfahrung keine Mindestansprüche an bestimmte Kriterien formulieren kann. Zudem ist eine größere Zahl an Alternativen nötig, zwischen denen gewählt werden kann. Bei nur zwei Alternativen macht die Methode wenig Sinn, sie kommt der Wahl der preisgünstigsten Alternative gleich.

Die Methode lässt sich leicht auf die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden übertragen. Bezüglich der gesonderten Betrachtung der Kosten gelten die Aussagen zur Kosten-Wirksamkeitsanalyse entsprechend. Durch die eingehende Beschäftigung mit der Problemstellung dürfte der Entscheider großes Vertrauen in die gefundene Lösung haben. Durch das interaktive Vorgehen lässt sie sich jedoch nicht automatisieren. Auch ist jenseits der Angabe der favorisierten Alternative keine Ordnung der übrigen Alternativen möglich.

## **3.4 Entscheidungen unter Ungewissheit und unter Unsicherheit**

### **3.4.1 Überblick**

Im Folgenden wird nicht mehr vorausgesetzt, dass die Ergebnisse einer Alternative zum Zeitpunkt der Entscheidung mit Sicherheit bestimmt werden können. Die Ergebnisse sind vielmehr von einem Umweltzustand  $Z$  abhängig, welcher durch die Entscheidung selbst nicht beeinflussbar ist [Mag (1990, S. 46–49)]. Jedoch wird gemäß dem *Grundmodell der Entscheidungstheorie* [Laux (2007, S. 34–42)] davon ausgegangen, dass ein Entscheidungsproblem für einen vorgegebenen Umweltzustand bewertet werden kann,

das Problem der multikriteriellen Bewertung also gelöst ist. Als Ergebnis der Multikriterienbewertung liegt für jede Alternative  $A$  im jeweiligen Umweltzustand  $Z$  ein Ergebnis  $Y(A, Z)$  vor. Dabei stellt  $Y_{ik} = Y(A_i, Z_k)$  das aggregierte kardinale (oder zumindest quasi-kardinale) Ergebnis der Alternative  $A_i$  für den Umweltzustand  $Z_k$  dar. Analog zum Multikriterienproblem lässt sich eine *Entscheidungsmatrix* aufstellen, mit den Alternativen in Reihen und den Umweltzuständen in Spalten (vgl. Abbildung 3-1). Zur begrifflichen Unterscheidung wird in dieser Arbeit jeweils entweder von einer Ergebnismatrix (Ergebnisse  $x$  bezüglich verschiedener Kriterien) oder von einer Entscheidungsmatrix (aggregierte Ergebnisse  $Y$  bezüglich verschiedener Umweltzustände) gesprochen.

	Umweltzustand $Z_1$	Umweltzustand $Z_2$	Umweltzustand $Z_k$	Umweltzustand $Z_l$
Alternative $A_1$	$Y_{11}$	$Y_{12}$	...	...
Alternative $A_2$	$Y_{21}$	$Y_{22}$	...	...
Alternative $A_i$	...	...	$Y_{ik}$	...
Alternative $A_m$	...	...	...	$Y_{ml}$

Abbildung 3-2: Entscheidungsmatrix mit aggregierten Ergebnissen  $Y_{ik}$

Nach dem Umfang der Informationen bezüglich der Umweltzustände werden zwei Situationen unterschieden. Bei der Entscheidung unter Ungewissheit (auch Unsicherheit im eigentlichen Sinne) ist zwar bekannt, welche Umweltzustände möglich sind, es liegen aber keinerlei Informationen bezüglich deren Eintrittswahrscheinlichkeit vor. Bei der Entscheidung unter Unsicherheit (auch Risiko) kann zu jedem Umweltzustand eine Eintrittswahrscheinlichkeit angegeben werden. Nach *Mag* (1990, S. 19–20) müssen in beiden Fällen alle relevanten Umweltzustände dem Entscheidungsträger bekannt sein. Die Ermittlung der relevanten Umweltzustände stellt also ein neues Teilproblem der Entscheidung unter Unsicherheit/Ungewissheit dar.

Im Folgenden wird zunächst die Sensitivitätsanalyse vorgestellt. Dieses Verfahren ist bei Ungewissheit geeignet, wenn die verschiedenen Umweltzustände durch einen numerischen Parameter mit kontinuierlichem Wertebereich charakterisiert werden können. In diesem Fall liegt ein kontinuierlicher Zustandsraum mit unendlich vielen Spalten in der Entscheidungsmatrix vor. Es folgt eine Darstellung der Szenariotechnik,

eines Verfahrens zur Exploration möglicher Umweltzustände, d.h. möglicher Spalten der Entscheidungsmatrix. Im Anschluss wird eine Auswahl an Entscheidungsregeln für die Fälle Ungewissheit und Unsicherheit (Risiko) bei diskretem Zustandsraum, also einer Entscheidungsmatrix mit endlicher Spaltenanzahl, dargestellt.

#### 3.4.2 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse ist ein Verfahren, mit dessen Hilfe der Einfluss unsicherer Eingangsdaten auf das Gesamtergebnis dargestellt werden kann. Sie kann unter zwei Fragestellungen durchgeführt werden [Götze (2008, S. 363–375)].

- Wie stark ändert sich das Gesamtergebnis vorgegebener Variation einer Eingangsgröße? (Bestimmung sensibler und wenig sensibler Einflussgrößen)
- Welchen Wert darf eine Eingangsgröße annehmen bzw. welche Wertekombinationen dürfen mehrere Eingangsgrößen annehmen, wenn ein bestimmtes Gesamtergebnis erreicht werden soll? (Bestimmung kritischer Werte bzw. Wertekombinationen)

Die konkrete Vorgehensweise bei einer Sensitivitätsanalyse ist von der Aufgabenstellung abhängig. Allgemein wird zunächst das Gesamtergebnis für eine Ausgangskonfiguration der Einflussgrößen ermittelt. Anschließend wird nacheinander jede Eingangsgröße innerhalb eines vorgegebenen Intervalls in Schritten variiert während die anderen Eingangsgrößen ihren Ausgangswert beibehalten. Zu jeder Variation wird das zugehörige Gesamtergebnis ermittelt. Die Ergebnisse können in einer Grafik veranschaulicht werden, die auf der Abszisse die Variation der Eingangsgrößen und auf der Ordinate das Gesamtergebnis, ggf. als Verhältniswert zum Gesamtergebnis der Ausgangskonfiguration, enthält. An der Steigung der einzelnen Geraden kann abgelesen werden, welche Eingangsgrößen das Ergebnis stark beeinflussen, also sensitiv sind, und welche Eingangsgrößen auch bei großen Schwankungen nur eine geringe Veränderung des Gesamtergebnisses hervorrufen, also wenig sensitiv sind.

Sensitivitätsanalysen können auf viele Entscheidungsmodelle mit Ein-Zahl-Gesamtergebnis angewendet werden (z.B. Nutzwertanalyse) und sind auch in der Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden eine empfehlenswerte Methode. Sie geben Einblick in die Struktur des Modells und helfen, die Bedeutung unsicherer Einflussgrößen einzuschätzen. Insbesondere bei der Entscheidung zwischen Alternativen kann die Sensitivitätsanalyse zur Überprüfung dienen, innerhalb welcher Grenzen die Eingangsgrößen variieren dürfen, ohne dass sich das Ranking der Alternativen ändert. Da der Zusammenhang zwischen Eingangsgröße und Ergebnis der Nachhaltigkeitsbeurteilung meist nichtlinear ist, ist die Anwendung auf Eingangsgrößen beschränkt, die innerhalb eines überschaubaren numerischen Intervalls schwanken und sich gegenseitig

nicht beeinflussen. Andernfalls bleibt die Aussagekraft der Sensitivitätsanalyse gering, da eine Erfassung aller Kombinationen von Eingangsgrößen am Aufwand scheitert.

#### 3.4.3 Szenariotechnik

Die Szenariotechnik wurde Anfang der 50er Jahre von Hermann Kahn zur Aufstellung militärischer Zukunftsperspektiven im Rahmen eines Projekts der US-Air-Force entwickelt und wird vor allem zur strategischen Planung eingesetzt [Dönitz (2009, S. 7), Knieß (2006, S. 149)]. Die Szenariotechnik dient dazu, plausible Zukunftsbilder aus der Analyse von Einflussfaktoren zu entwickeln. Ein Szenario stellt dabei keine Prognose im Sinne einer Vorhersage dar, sondern zeichnet eines von mehreren möglichen Bildern der Zukunft. Sie beruht jedoch im Gegensatz zur reinen Spekulation auf fundierten, begründeten Annahmen (vgl. Abbildung 3-3). Die Szenariotechnik eignet sich insbesondere, wenn ein Themenfeld stark durch äußere Einflüsse geprägt ist [Geschka (2006, S. 361)].

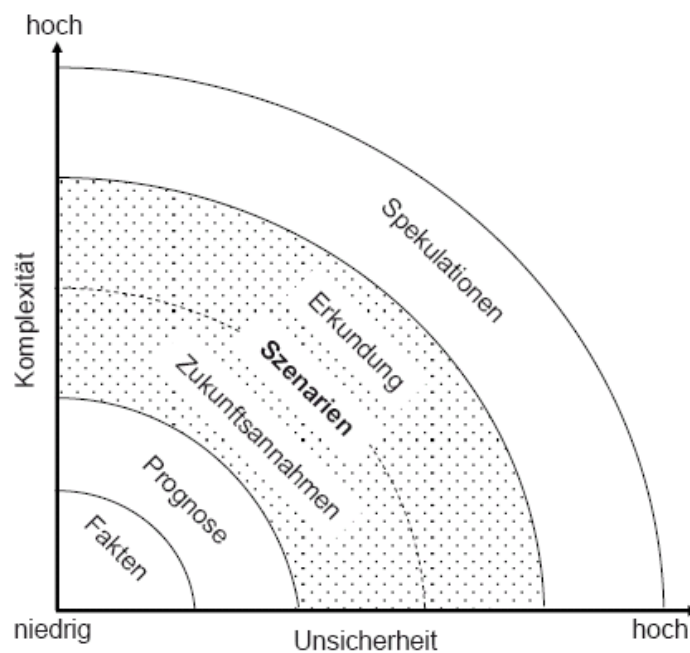


Abbildung 3-3: Szenarien im Feld aus Komplexität und Unsicherheit [nach Dönitz (2009, S. 7) in Anlehnung an Zurek & Henrichs (2007, S. 1284)]

Nach *Geschka* (2006, S. 363–368) wird die Szenariotechnik in acht Schritten durchgeführt<sup>19</sup>.

#### Schritt 1: Problemanalyse

Der erste Schritt besteht in der Definition und Strukturierung des Untersuchungsthemas. Die Aufgabenstellung muss klar definiert und der Untersuchungsrahmen räumlich und zeitlich abgegrenzt werden.

#### Schritt 2: Umfeldanalyse

Im zweiten Schritt werden die das Problem bestimmenden äußeren Einflussfaktoren identifiziert. Es gilt, eine übersichtliche Zahl an Einflussfaktoren nach ihrer Wichtigkeit für das Thema auszuwählen, zu strukturieren und die Wirkung des Umfelds auf das Problem darzustellen. Die wechselseitigen Beziehungen zwischen Umfeld und Problem werden analysiert und veranschaulicht, z.B. in einem Wirkungsdiagramm.

#### Schritt 3: Formulierung von Deskriptoren und Aufstellen von Zukunftsannahmen

Im nächsten Schritt werden für die ermittelten Einflussfaktoren Kenngrößen, die Deskriptoren, festgelegt. Sie beschreiben, möglichst als quantifizierbare Größen, die zukünftige Entwicklung der Einflussgrößen. Man unterscheidet zwischen unkritischen Deskriptoren, deren zukünftige Entwicklung eindeutig ist, und kritischen Deskriptoren, für die mehrere plausible Zukunftsannahmen ausgearbeitet werden.

#### Schritt 4: Bildung und Auswahl konsistenter Annahmebündel

Die alternativen Annahmen für die kritischen Deskriptoren sind nicht beliebig miteinander kombinierbar, da sie sich widersprechen können. Im vierten Schritt gilt es daher, die verschiedenen denkbaren Bündelungen von Annahmen auf ihre Stimmigkeit zu überprüfen und zwei bis drei Sätze als Grundlage für die Szenarienausarbeitung auszuwählen. Als weiteres Auswahlkriterium neben der Konsistenz wird eine möglichst große Unterschiedlichkeit der Szenarien angestrebt. Neben der intuitiven Auswahl werden in der Literatur verschiedene algorithmische Verfahren zur Auswahl der Annahmebündel vorgestellt (vgl. hierzu Dönitz (2009, S. 24–31)). Die Notwendigkeit für eine EDV-gestützte Analyse liegt auf der Hand, wenn man bedenkt, dass die Zahl der Annahmebündel sprunghaft mit der Zahl der Alternativannahmen für die Deskriptoren ansteigt. Beispielsweise ergeben sich bei zehn Deskriptoren mit je zwei alternativen Annahmen über 1000 Annahmebündel als mögliche Szenarien, bei zwölf Deskriptoren mit je drei alternativen Annahmen bereits über 500.000.

---

<sup>19</sup> Vgl. hierzu auch Dönitz (2009, S. 10–24) zur Beschreibung der einzelnen Schritte mit Beispielen

#### Schritt 5: Interpretation der Umfeldszenarien

Im fünften Schritt werden die ausgewählten Annahmebündel nun in Schritten von der Gegenwart bis zum Zielzeitpunkt zu Szenarien ausformuliert. Die verbale Darstellung ist meist möglich griffig, z.B. ein Tag im Leben einer bestimmten Person oder als Zeitungsmeldung. Die Darstellung soll die Vernetzung der Einflussgrößen und ihre Wirkung auf das Problem verständlich machen.

#### Schritt 6: Trendbruchanalyse

In der Zukunft können Ereignisse auftreten, die die Entwicklung der Deskriptoren sprunghaft beeinflussen. Bei diesen Trendbrüchen kann es sich um negative Ereignisse, wie Naturkatastrophen, aber auch um positive, wie technologische Durchbrüche, handeln. Im sechsten Schritt werden denkbare Trendbrüche identifiziert und ihre Wirkung auf die Szenarien analysiert, um die Stabilität der Szenarien zu untersuchen. Wirkungsintensive Trendbrüche finden ihren Eingang in eine neue Variante des Szenarios.

#### Schritt 7: Auswirkungsanalyse

Im siebten Schritt werden die Auswirkungen jedes Umfeldszenarios auf das Problem ermittelt. Häufig geschieht dies bereits in Schritt 5.

#### Schritt 8: Maßnahmenplanung

Dieser letzte Schritt gehört im engeren Sinne nicht mehr zur Szenarienanalyse. Es werden die Erkenntnisse der Szenarienanalyse in Lösungsansätze umgesetzt und damit die eigentliche Aufgabenstellung abgeschlossen.

Die Szenariotechnik zählt zu den anerkannten und verbreiteten Methoden und wird auch und gerade bei Problemstellungen aus dem Bereich der Nachhaltigkeit angewendet. Beispiele sind die Szenarien des Weltklimarats (IPPC) zur Klimaerwärmung [Nakicenovic & Swart (2000)], die Szenarien des Statistischen Bundesamtes zur Bevölkerungsentwicklung in Deutschland [Statistisches Bundesamt (2009a)] und die Szenarien aus dem Forschungsprojekt „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland“ der Helmholtz-Gemeinschaft [Coenen & Grunwald (2003, S. 207–268)]. Die drei explorativen Szenarien der Helmholtz-Gemeinschaft befassen sich mit der Entwicklung gesamtwirtschaftlicher Größen und zentraler Nachhaltigkeitsindikatoren und wurden unter anderem speziell hinsichtlich ihrer Auswirkungen im Bereich Bauen und Wohnen untersucht [Jörissen et al. (2005, S. 279–302)]. Die Entwicklung von Szenarien erfolgt bisher im Problemfeld der nachhaltigen Entwicklung also eher unter globaler oder gesamtgesellschaftlicher Perspektive und ist für diese Szenarien mit einem relativ großen Aufwand verbunden. Für die Übertragung auf die Beurteilung einzelner Bauwerke bietet es sich jedoch an, auf solch existierende fundierte Szenarien zurückzugreifen.

### 3.4.4 Entscheidungsregeln bei Ungewissheit

Liegen dem Entscheider keine Informationen über die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Umweltzustände vor, so handelt es sich um eine Entscheidung unter Ungewissheit. Für diese Situationen nennt die Literatur rationale Entscheidungsregeln, von denen einige im Folgenden vorgestellt werden. Zur Illustration mögen die Zahlenbeispiele in Anhang D dienen.

Nach der **Dominanz-Regel** können analog zur Multikriterienentscheidung unter Sicherheit diejenigen Alternativen ausgeschlossen werden, die von einer anderen Alternative dominiert werden. Für den Sonderfall einer absolut dominanten Alternative, die allen anderen Alternativen in mindestens einem Umweltzustand überlegen und in allen anderen Zuständen mindestens ebenbürtig ist, stellt diese die favorisierte Lösung dar.

Im Regelfall führt die alleinige Anwendung der Dominanz-Regel jedoch nicht zu einer eindeutig besten Alternative. Dann kann eine der folgenden Regeln angewendet werden. Es ist zu bedenken, dass die Wahl der Regel eine subjektive Entscheidung darstellt, die auf den Präferenzen des Entscheiders beruht. Einige der folgenden Regeln berücksichtigen die Präferenzen des Entscheiders direkt, was diesem zusätzliche Angaben abverlangt.

Die **Maximin-Regel** kann als das Prinzip der Schadensminimierung interpretiert werden [Götze (2008, S. 346)]. Favorisiert wird die Alternative  $A^*$ , deren auf alle Umweltzustände bezogenes schlechtestes Ergebnis am größten ist, also

$$\min_k Y(A^*, Z_k) = \max_i (\min_k Y_{ik}) \quad \text{Gl. 3-3}$$

Die Maximin-Regel spiegelt die Präferenz eines sehr pessimistischen Entscheiders wider.

Die **Maximax-Regel** stellt demgegenüber einen sehr optimistisch eingestellten Entscheider dar [Götze (2008, S. 347)]. Es wird diejenige Alternative gewählt, die das beste Ergebnis bringt, also

$$\max_k Y(A^*, Z_k) = \max_i (\max_k Y_{ik}) \quad \text{Gl. 3-4}$$

Bei der Maximax-Regel spielen mögliche schlechte Ergebnisse keine Rolle.



Eine Mischung der pessimistischen und der optimistischen Sichtweise ist mit der **Hurwicz-Regel** möglich, die auch unter dem Namen Optimismus-Pessimismus-Regel bekannt ist [Götze (2008, S. 347–348)]. Das beste und das schlechteste Ergebnis einer Alternative über alle Umweltzustände werden mit dem Optimismuskoeffizienten  $\alpha$  gewichtet:

$$\begin{aligned} (1 - \alpha) \cdot \min_k Y(A^*, Z_k) + \alpha \cdot \max_k Y(A^*, Z_k) = \\ = \max_i [(1 - \alpha) \cdot \min_k Y_{ik} + \alpha \cdot \max_k Y_{ik}] \end{aligned} \quad \text{Gl. 3-5}$$

Es ist ersichtlich, dass  $\alpha = 1$  zu optimistischen Maximax-Regel führt, während  $\alpha = 0$  der pessimistischen Maximin-Regel entspricht. Voraussetzung bei Einsatz der Hurwicz-Regel ist, dass der Entscheider seine Präferenz (eher optimistisch oder eher pessimistisch) auf einer Skala von 1 bis 0 anzugeben vermag. Es bietet sich jedoch eine Sensitivitätsanalyse über den Optimismuskoeffizienten an, um die Stabilität der Rangfolge der Alternativen einschätzen zu können.

Bei der **Savage-Niehans-Regel** wird zunächst die Bewertungsmatrix in eine Opportunitätskosten-Matrix transformiert, indem an Stelle des Nutzens die Differenz zwischen dem Nutzen der Alternative und dem größtmöglichen Nutzen aller Alternativen für denselben Umweltzustand tritt [Bamberg, Coenenberg & Krapp (2008, S. 117–118)]. Diese Differenz kann als Nutzenverlust gedeutet werden, den man erleidet, weil ein bestimmter Umweltzustand eingetreten ist, und man nicht die beste Alternative gewählt hat. Sie wird als Regret R (engl.: Bedauern) bezeichnet:

$$R(Y_{ik}) = \max_i Y_{ik} - Y_{ik} \quad \text{Gl. 3-6}$$

Die Entscheidung erfolgt nach dem Prinzip, dass das Bedauern des Entscheiders zu minimieren ist:

$$\max_k R(Y(A^*, Z_k)) = \min_i \left( \max_k R(Y_{ik}) \right) \quad \text{Gl. 3-7}$$

Bei der Savage-Niehans-Regel kann die Hinzu- oder Wegnahme einer Alternative zu einer Änderung der Rangfolge der Alternativen führen.

Methodischer Nachteil der vier vorgenannten und ähnlicher Regeln ist, dass nicht alle bekannten Nutzenwerte in die Entscheidung einfließen und damit wesentliche Informationen verworfen werden.

Ein andersartiger Ansatz liegt der **Krelle-Regel** zugrunde [Bamberg, Coenenberg & Krapp (2008, S. 118–120)]. Der Entscheider muss hierzu zunächst vor hypothetische Entscheidungsprobleme unter Ungewissheit gestellt werden. Aus seinen Antworten kann eine vom Entscheider abhängige Unsicherheitspräferenzfunktion  $\omega$  abgeleitet werden, mit deren Hilfe die Ergebnisse  $Y$  transformiert werden. Die favorisierte Alternative  $A^*$  wird anhand der größten Summe der Unsicherheitspräferenzwerte ausgewählt:

$$\sum_k \omega(Y(A^*, Z_k)) = \max_i \sum_k \omega(Y_{ik}) \quad \text{Gl. 3-8}$$

Mit Hilfe der Krelle-Regel werden alle Nutzenwerte der Entscheidungsmatrix für die Entscheidung berücksichtigt und sie gibt die Präferenzen des Entscheiders individuell wieder. Jedoch erfordert es eine hohe Kompetenz des Entscheiders, die hypothetischen Situationen zu bewerten. Für die Nachhaltigkeitsbewertung als einem Feld, das für die Anwender gemeinhin sowieso schwer greifbar ist, wäre die Krelle-Regel wohl nur praktikabel, wenn man sich auf allgemeingültige Unsicherheitspräferenzfunktionen einigen könnte und diese für alle Entscheidungen anwendete.

Bei der **Laplace-Regel** wird nach dem Prinzip des unzureichenden Grundes davon ausgegangen, dass es keine Veranlassung gibt anzunehmen, dass ein bestimmter Umweltzustand wahrscheinlicher eintritt als die anderen [Bamberg, Coenenberg & Krapp (2008, S. 116–117)]. Die Eintrittswahrscheinlichkeit muss dann für alle Umweltzustände gleich groß angenommen werden und die Entscheidung kann nach der größten Summe der Ergebnisse erfolgen:

$$\sum_k Y(A^*, Z_k) = \max_i \sum_k Y_{ik} \quad \text{Gl. 3-9}$$

Bei Anwendung der Laplace-Regel kann sich die Rangfolge der Alternativen ändern, wenn eine weitere Umweltsituation in die Betrachtungen mit einbezogen wird. Das Bewertungsergebnis ist stark davon abhängig, welche Umweltsituationen der Entscheider für seine Bewertung auswählt.

Prinzipiell können die oben dargestellten Entscheidungsregeln auch für Probleme der Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken verwendet werden. Sie führen jedoch in der Regel zu unterschiedlichen Bewertungen der Ergebnismatrix und damit zu unterschiedlichen Rangfolgen der Alternativen. Die Wahl der passenden Entscheidungsregel stellt also für sich bereits ein Entscheidungsproblem dar – ein sogenanntes Metaproblem.

#### 3.4.5 Entscheidungsregeln bei Unsicherheit (bei Risiko)

Kennzeichen der Entscheidungssituation unter Unsicherheit, auch Entscheidungssituation unter Risiko genannt, ist, dass verschiedene sich gegenseitig ausschließende Umweltzustände bekannt sind, zu denen Eintrittswahrscheinlichkeiten angegeben werden können.

Bei der **Bayes-Regel** wird der Erwartungswert  $\mu$  der Alternativen als Entscheidungskriterium verwendet [Götze (2008, S. 348–349)]. Der Erwartungswert ist dabei die Produktsumme aus den Ergebnissen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten. Die optimale Alternative ergibt sich mit  $p_k$  als Wahrscheinlichkeit für den Umweltzustand  $Z_k$  zu

$$\mu(A^*) = \max_i \mu(A_i) \quad \text{Gl. 3-10}$$

mit

$$\mu(A_i) = \sum_k Y_{ik} \cdot p_k \quad \text{Gl. 3-11}$$

Diese Regel ist auch als  $\mu$ -Regel bekannt und entspricht einer risikoneutralen Einstellung des Entscheiders, da keine weiteren Informationen über die Verteilungsfunktion der Ergebnisse  $Y$  eingezogen werden. Die Bayes-Regel ist bei Entscheidungen, die sich oft wiederholen oder nur von geringer Tragweite sind, angebracht [Dörsam (2007, S. 44)]. Für Einzelentscheidungen von großer Tragweite ist die risikoneutrale Entscheidungsregel hingegen nicht angemessen.<sup>20</sup>

Durch Hinzunehmen der Standardabweichung  $\sigma$  lassen sich verschiedene Formen von  **$\mu$ - $\sigma$ -Regeln** definieren, um eine Risikoaversion oder -sympathie berücksichtigen zu können. Um jedoch eine Standardabweichung der Ergebnisse angeben zu können muss deren Verteilungsfunktion bekannt sein, oder sie muss aus hinreichend vielen Werten näherungsweise bestimmt werden können.

---

<sup>20</sup> Ein risikoneutraler Entscheider wäre z.B. indifferent zwischen einem sicheren Ergebnis von 100 und einer Situation, in der mit einer Wahrscheinlichkeit von 10% ein Ergebnis von 1000 erzielt wird und mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% ein Ergebnis von 0. Eine risikoneutrale Einstellung liegt nur in seltenen Fällen vor. Meist wird ein Entscheider in seine Überlegungen einbeziehen, wie sicher er mit einem Ergebnis rechnen kann.

Bei der **Hodges-Lehmann-Regel** wird die Bayes-Regel mit der Maximin-Regel kombiniert [Bamberg, Coenenberg & Krapp (2008, S. 128)]:

$$\lambda \cdot \mu(A^*) + (1 - \lambda) \cdot \min_k Y(A^*, Z_k) = \max_i \left( \lambda \cdot \mu(A_i) + (1 - \lambda) \cdot \min_k Y_{ik} \right) \quad \text{Gl. 3-12}$$

Der Parameter  $\lambda$  ist vom Entscheidungsträger zwischen 0 und 1 zu wählen. Für  $\lambda = 0$  entspricht die Regel der Maximin-Regel, für  $\lambda = 1$  der Bayes-Regel. Die Regel bietet sich für Entscheidungssituationen an, die zwischen Unsicherheit und Ungewissheit liegen.

Beim **Bernoulli-Kriterium** werden die Werte der Entscheidungsmatrix durch deren Erwartungsnutzen ersetzt [Götze (2008, S. 350)]. Die beste Alternative wird dann nach dem Maximalprinzip gewählt. Durch Befragen des Entscheiders muss die für ihn gültige Risiko-Nutzenfunktion ermittelt werden, mit deren Hilfe sich das Ergebnis einer Alternative in dessen Erwartungsnutzen transformieren lässt. Hierzu wird er, ähnlich wie bei der multi-attributiven Nutzentheorie<sup>21</sup>, vor hypothetische Entscheidungssituationen gestellt. Er muss dazu zwei Situationen – eine mit sicherem Ergebnis und eine mit unsicheren Ergebnissen – so modifizieren, dass er zwischen beiden indifferent ist. Hierzu gibt es verschiedene Vorgehensweisen, bei denen entweder nach einem sicheren Ergebnis, dem Sicherheitsäquivalent, oder der Indifferenzwahrscheinlichkeit gefragt wird [vgl. hierzu z.B. anschaulich Laux (2007, S. 166–171), mit weiteren Literaturstellen Bamberg, Coenenberg & Krapp (2008, S. 79–81)]. Bei einer risikoneutralen Einstellung stimmt das Bernoulli-Kriterium mit der Bayes-Regel überein, das Sicherheitsäquivalent entspricht dem Erwartungswert des Ergebnisses. Die Schwierigkeit bei Anwendung des Kriteriums besteht in der Ermittlung der Risiko-Nutzenfunktion, die dem Entscheider hohe Kompetenz und vor allem Erfahrung mit der Bewertungsgröße voraussetzt – eine Bedingung die bei den abstrakten Bewertungsgrößen der multikriteriellen Entscheidungsprobleme nicht gegeben ist.

Alle genannten Entscheidungsregeln unter Unsicherheit sind für die Nachhaltigkeitsbeurteilung von Bauwerken streng genommen nicht anwendbar, da den Umweltsituationen hierfür zwingend Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden müssen [Bamberg, Coenenberg & Krapp (2008, S. 67)]. Bei der vorausschauenden Lebenszyklusbetrachtung ist davon auszugehen, dass dem Entscheider die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Umweltsituationen unbekannt sind. Demgegenüber vertritt Laux (2007, S. 120) die Auffassung, dass im Allgemeinen gewisse Glaubwürdigkeitsvorstellungen existieren, die als subjektive Wahrscheinlichkeiten formuliert werden

---

<sup>21</sup> Zum Zusammenhang zwischen dem Erwartungsnutzen in Risikosituationen (Bernoulli-Nutzen) und dem Nutzen bei Multikriterien-Problemen (MAUT-Nutzen) vgl. Bamberg; Coenenberg & Krapp (2008, S. 77–78)

können. Wenn dies nicht der Fall ist, so könne nach dem Prinzip des unzureichenden Grundes von der gleichen Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen werden. *Sinn* (1980, S. 32–47) geht soweit, Glaubwürdigkeitsvorstellungen mit objektiven Wahrscheinlichkeiten gleichzusetzen. Durch Anwendung des Prinzips des unzureichenden Grundes und dessen Kombination mit einer Stufentheorie der Wahrscheinlichkeiten gelingt es ihm, jede Ungewissheitssituation in eine Risikosituation zu überführen<sup>22</sup>.

## 3.5 Diskussion weiterer Lösungsansätze

### 3.5.1 Konzept der Realoptionen

Das Konzept der Realoptionen stammt ursprünglich aus dem Bereich der Finanzwirtschaft, wo unter einer Option ein handelbares Recht verstanden wird, ein Produkt zu einem späteren Zeitpunkt zu einem heute festgelegten Preis zu kaufen oder zu verkaufen. Der Inhaber der Option hat die Möglichkeit, die Option wahrzunehmen oder verfallen zu lassen, je nachdem welches Vorgehen sich in der Zukunft als günstiger herausstellt.

Übertragen auf den Lebenszyklus von Gebäuden besitzt eine Alternative eine sogenannte Realoption, wenn die Möglichkeit besteht, in einer späteren Situation angemessen zu reagieren. Einige Realoptionen sind Gebäuden per se inhärent, z.B. die Option ein Gebäude zu modernisieren oder abzureißen und neu zu bauen. Andere Realoptionen werden explizit eingeplant, wofür in der Regel ein gewisser Aufwand als Vorleistung zu erbringen ist, z.B. die Option ein Gebäude zu erweitern [Ellingham & Fawcett (2006, S. 67)].

Jede Realoption besitzt einen Wert, der in der Entscheidungsfreiheit liegt, auf derzeit noch unbekannte Entwicklungen in Zukunft angemessen reagieren zu können. Der allgemeine Sprachgebrauch erkennt diesen Wert in Formulierungen wie „sich alle Optionen offenhalten“ oder „sich eine Chance verbauen“. Realoptionen können in die Lebenszykluskostenrechnung integriert werden, indem der Barwert einer Alternative um den (Bar-)Wert der mit ihr gewonnenen Optionen vergrößert und gleichzeitig um den (Bar-)Wert der verlorenen Optionen vermindert wird.

---

<sup>22</sup> Die Stufentheorie kennt Wahrscheinlichkeiten höherer Ordnung. Ist ein Ereignis sicher mit einer Wahrscheinlichkeit  $p$  verknüpft, so ist dies eine Wahrscheinlichkeit erster Stufe. Schätzt ein Entscheider ein, dass ein Ereignis wohl mit der Wahrscheinlichkeit  $p_1$ ,  $p_2$  oder  $p_3$  eintritt, so stellen seine Glaubwürdigkeitsvorstellungen zum Eintreten von  $p_1$ ,  $p_2$  bzw.  $p_3$  Wahrscheinlichkeiten zweiter Stufe. Darüber liegen analog Wahrscheinlichkeiten dritter usw. Stufe.

Der Wert einer Realoption ist nach *Ellingham & Fawcett* (2006, S. 120) umso größer, je

- unsicherer die Zukunft ist, denn bei vollkommener Sicherheit über die Zukunft könnten auch alle Entscheidungen direkt heute gefällt werden.
- länger die Option bestehen bleibt. Viele Realoptionen sind allerdings während der gesamten Lebensdauer des Gebäudes oder Bauteils gegeben und verfallen nicht.
- wahrscheinlicher die Option tatsächlich genutzt wird.
- geringer die "Transaktionskosten" sind, also je weniger Aufwand das Realisieren der Option bereitet.
- größer der gewonnene Nutzen bei einer Realisierung der Option ist.

Das Konzept der Optionen wurde bereits erfolgreich auf Entscheidungen im Bauwesen<sup>23</sup> übertragen und konnte zum Teil das scheinbar irrationale Verhalten von Entscheidungsträgern erklären. Diese entscheiden sich bisweilen gegen eine Variante, die bei einer Bewertung ohne Berücksichtigung der Unsicherheit als vorteilhaft gilt, weil sie Optionen intuitiv in ihre Entscheidung einbeziehen (vgl. z.B. *Ellingham & Fawcett* (2001) zur Entscheidung über eine Fenstererneuerung).

*König, Kohler, et al.* (2009, S. 16) sehen im Konzept der Realoptionen einen „vielversprechende[n] Ansatz, mit Unsicherheiten im Lebenszyklus von Gebäuden umzugehen“. Dem stehen jedoch Schwierigkeiten bei der Quantifizierung des Werts der Realoptionen im Wege. Diese erfordert ihrerseits den Einsatz von Methoden für Situationen unter Unsicherheit, z.B. Risikoanalysen und Simulationen, mit dem Problem der Quantifizierung von Wahrscheinlichkeiten bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Dennoch bietet das Konzept der Optionen eine hilfreiche Sichtweise auf Entscheidungsprobleme unter Unsicherheit. Auch wäre es möglich, die Überlegungen von der Kostenbetrachtung zu abstrahieren und auf die Betrachtung nicht-finanzieller Ressourcen zu übertragen.

#### 3.5.2 Fuzzy-Logik-Ansätze

Die Theorie der unscharfen Mengen, der sogenannten Fuzzy Sets, und der Fuzzy Systeme entstand in den 1960er Jahren [*Seising* (2005)]. Die Fuzzy-Logik ermöglicht es, unscharfe Größen zu modellieren und in mathematischen Modellen zu verwenden. Damit wird es möglich, mit nicht scharf quantifizierbaren Größen eindeutige Rechenoperationen durchzuführen. Beispielsweise kann der Begriff „mäßig warm“ als linguistische Größe nicht eindeutig einer technischen Größe zugeordnet werden, da er naturgemäß unscharf ist. In der Fuzzy-Logik ist es nicht nötig, den Begriff mit einer diskreten Temperatur zu

---

<sup>23</sup> vgl. auch *Müssigbrodt* (2009) zur Anwendung von Realoptionen in der Immobilienbewertung

beschreiben, z.B. „mäßig warm“ =  $21^{\circ}\text{C}$ . Eine solche scharfe Definition führt für viele Anwendungsbereiche zu einer unbefriedigenden Lösung, da schon eine Temperatur von  $20,5^{\circ}$  nicht mehr unter die Definition fiel. In der Fuzzy-Logik kann der Begriff stattdessen durch eine Zugehörigkeitsfunktion beschrieben werden, die für jeden Temperaturwert angibt, wie sehr er zur Menge „mäßig warm“ gehört. Beispielsweise könnte eine Temperatur von  $10^{\circ}\text{C}$  nicht zur Menge „mäßig warm“ gehören,  $21^{\circ}\text{C}$  eine Zugehörigkeit von 1 besitzen und  $18^{\circ}\text{C}$  eine Zugehörigkeit von 0,4. An dieser Stelle sei lediglich auf Abbildung 3-4 zur Veranschaulichung verwiesen sowie auf die umfangreiche Literatur zum Thema<sup>24</sup>.

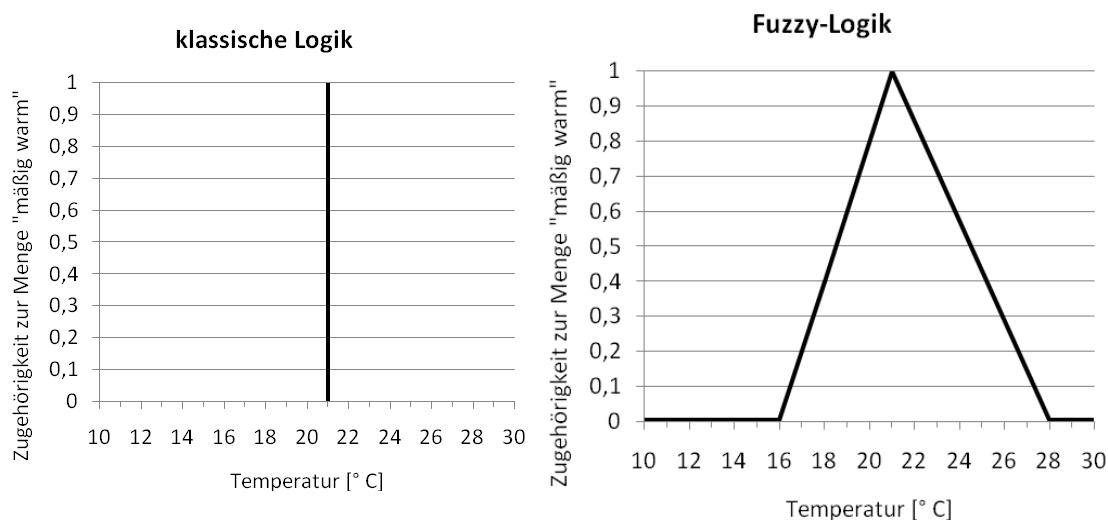


Abbildung 3-4: Beispielbegriff „mäßig warm“ in der klassischen Logik und der Fuzzy-Logik

Wichtig anzumerken ist an dieser Stelle, dass die Zugehörigkeit zu einer Fuzzy-Menge nicht als Wahrscheinlichkeit zu deuten ist. Die Unschärfe entsteht nicht durch stochastisch beschreibbare Unsicherheit sondern durch Mehrdeutigkeit<sup>25</sup>. Dennoch kann die Fuzzy-Logik dort angewendet werden, wo Eingangsgrößen und Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge ungewiss/unsicher sind. In diesem Fall entsteht die Unschärfe weniger durch linguistische Begriffe als vielmehr durch fehlende Daten. Auch kann Fuzzy-Logik gezielt eingesetzt werden, wenn die Anwendung der klassischen Logik zu unhandlichen Rechenmodellen führte.

---

<sup>24</sup> Einführungen in deutscher Sprache sind z.B. Friedrich (2006), Grauel (1995), Bandemer & Gottwald (1993) u.a.m.

<sup>25</sup> Z.B. zeigt sich die Unterschiedlichkeit von Fuzzy-Logik und Wahrscheinlichkeitstheorie daran, dass sich Zugehörigkeiten zu Fuzzy-Mengen nicht notwendig zu 1 addieren. Beispielsweise könnte die Temperatur von  $21^{\circ}\text{C}$  eine Zugehörigkeit von 1 zur Menge „mäßig warm“ besitzen, und gleichzeitig eine Zugehörigkeit von 0,6 zur Menge „sehr warm“.

Wurde die Fuzzy-Logik zunächst mit großem Erfolg vor allem in der Regelungstechnik eingesetzt, so findet sie mittlerweile unzählige Anwendungsgebiete, darunter auch Entscheidungsprobleme. Besonders geeignet scheint die Fuzzy-Logik nach Ansicht von *Benetto, Dujet & Rousseaux* (2008) für Outranking-Verfahren [z.B. *Munda* (1995), *Meyer & Roubens* (2005)], die jedoch für die vorliegende Problemstellung als ungeeignet einzustufen sind. Aber auch für Nutzwertanalyse und AHP-Methode gibt es Pendanten aus der Fuzzy-Logik [Rommelfanger (2006)]. Zum einen kann die Fuzzy-Logik eingesetzt werden, wenn der Nutzwert nicht scharf quantifizierbar ist, z.B. „ökologisch bedenklich“ anstelle konkreter Ökobilanzwerte. In der vorliegenden Arbeit sind LCA und LCC jedoch quantifizierbar. Zum anderen liegt bei den Wichtungsfaktoren der Einsatz von Fuzzy-Mengen (z.B. „sehr wichtig“, „eher unwichtig“) anstelle klassischer Prozentzahlen auf der Hand. Hierzu muss sich der Entscheider jedoch mit dem Konzept der Fuzzy-Logik auseinandersetzen. Wird das Verfahren wie eine „Black Box“ angewendet, ist zu befürchten, dass er kein Vertrauen in das Ergebnis besitzt. Für die vorliegende Arbeit wird die Bestimmung der Wichtungen nach dem paarweisen Vergleich der klassischen AHP-Methode vorgezogen und eine Sensitivitätsanalyse zum Einfluss der Wichtungen empfohlen.

Auch wurde die Fuzzy-Logik im Bereich der Ökobilanzierung eingesetzt. Dort eignet sie sich zum einen für unscharfe Eingangsgrößen der Sachbilanz [González, Adenso-Díaz & González-Torre (2002)], zum anderen für unscharfe Zusammenhänge bei der Wichtung und Interpretation [Geldermann, Spengler & Rentz (2000), *Benetto, Dujet & Rousseaux* (2008)]. Letzteres Problem wurde oben bereits bei den Fuzzy-Entscheidungsverfahren diskutiert. Bezüglich unscharfer Eingangsgrößen wird in der vorliegenden Arbeit davon ausgegangen, dass die Ökobilanzen der einzelner Bauprodukte sowie Prozesse vorliegen und aus Datenbanken entnommen werden können und somit keine Unschärfe besteht. Ferner gibt es Ansätze für ein Fuzzy-Life-Cycle-Costing [Sobanjo (1999), *Kishk & Al-Hajj* (2000)], das eingesetzt werden kann, wenn die Eingangsgrößen der Lebenszykluskostenrechnung unscharf sind. Für die vorliegende Arbeit wird analog zur Ökobilanz davon ausgegangen, dass solche Eingangsdaten bekannt sind, bzw. hinreichend gut abgeschätzt werden können und ggf. eine Sensitivitätsanalyse erfolgt.

### **3.6 Zusammenfassung**

Im vorliegenden dritten Kapitel wurden aus der Literatur bekannte Lösungsansätze der Entscheidungstheorie vorgestellt und abgeschätzt, inwiefern sie auf die vorliegende Problemstellung übertragen werden können.

Es zeigte sich zunächst, dass sich die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden als Multikriterienproblem unter Ungewissheit charakterisieren lässt. Meist liegt ein Entscheidungsproblem unter Ungewissheit im eigentlichen Sinne vor. Da aber bei den



Entscheidern häufig gewisse Vorstellungen über Eintrittswahrscheinlichkeiten vorliegen, lässt es sich teils auf ein Entscheidungsproblem unter Unsicherheit zurückführen.

In Abschnitt 3.3 wurde zunächst die Ergebnismatrix (Reihen mit Alternativen und Spalten mit Kriterienbewertungen) als verallgemeinerte Darstellung eines Multikriterienproblems vorgestellt. Als generelle Vorgehensweise ist es immer empfehlenswert, die Matrix auf dominante und ineffiziente Alternativen zu untersuchen sowie ein Screening anhand von Mindestanforderungen vorzunehmen. Von den weiteren vorgestellten Lösungsalgorithmen für Multikriterienprobleme sind diejenigen, die einen kardinalen oder zumindest quasi-kardinalen Gesamtnutzen ermitteln, insbesondere die Nutzwertanalyse, als geeignet hervorzuheben. Die Effizienzwertverfahren erwiesen sich hingegen als nicht auf das Problem der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden anwendbar. Doch enthalten einige der Verfahren hilfreiche Elemente, wie z.B. den paarweisen Vergleich von Bedeutungen (AHP), die Ableitung einer Ideallösung aus der Ergebnismatrix (TOPSIS) oder die iterative Korrektur des Anspruchsniveaus (Preis-Leistungsmodell).

In Abschnitt 3.4 wurde das Analogon zur Ergebnismatrix, nämlich die Entscheidungsmatrix für Situationen unter Unsicherheit bzw. Ungewissheit vorgestellt. Die Matrix enthält jeweils aggregierte Ergebnisse (Reihen mit Alternativen und Spalten mit Umweltzuständen). In Situationen mit einem einzelnen kontinuierlichen unbekannten Parameter hat die Entscheidungsmatrix unendlich viele Spalten. Die Sensitivitätsanalyse stellt dann ein geeignetes Verfahren zur Untersuchung des Parameters dar und lässt sich in begrenztem Umfang auch bei mehreren Parametern noch anwenden. In Situationen mit mehreren, auch diskontinuierlichen oder voneinander abhängigen Parametern stellt die Szenariotechnik ein Instrument dar, um von einem unendlichen Zustandsraum zu einer Entscheidungsmatrix mit überschaubarer Spaltenanzahl zu gelangen. Für derartige Matrizen sind dann Entscheidungsregeln aus der Literatur bekannt, die im Einzelnen erläutert wurden. Besonders aussagekräftig erscheinen aus Sicht des Ingenieurs diejenigen Regeln, die Wahrscheinlichkeiten einbeziehen. Doch auch solche Regeln, die auf eingängigen Prinzipien, wie z.B. dem der Schadensminimierung beruhen, verdienen Beachtung bei der Entwicklung einer Methodik zur Nachhaltigkeitsbewertung unter ungewissem Lebensweg.

In Abschnitt 3.5 wurden schließlich zwei weitere spezielle Lösungsansätze diskutiert, die sich jedoch für die vorliegende Aufgabenstellung als nicht zielführend erwiesen.

## **4 ENTWICKLUNG EINER METHODIK ZUR LEBENSZYKLUS-ANALYSE UNTER UNGEWISSHEIT**

### **4.1 Einführung**

Nachdem im vorangegangenen Kapitel sowohl die Problemstellung der vorliegenden Arbeit näher charakterisiert wurde, als auch bekannte Lösungselemente aus der Literatur vorgestellt wurden, soll auf dieser Basis nun eine Methodik zur Lebenszyklusanalyse von Baukonstruktionen unter Ungewissheit entwickelt werden.

Hierzu wird zunächst die Zielsetzung bezüglich der Aufgabenstellung und des Anwendungsbereichs der Methodik konkretisiert.

Danach wird der grundlegende Lösungsansatz vorgestellt. Dieser besteht aus zwei thematisch getrennten Teilen, dem kardinalen Analyseverfahren sowie dem Verfahren zur Lebenszyklus-Szenarienbewertung, die in Abschnitt 4.4 und in Abschnitt 4.5 detailliert erläutert werden.

Dass sich aus der entwickelten Methodik wichtige Konsequenzen für die Modellbildung ergeben, wird im darauffolgenden Abschnitt dargelegt. Hier werden Fragen zum Gebäudemodell, zum Lebenszyklusmodell und zu Betrachtungsrahmen und Bezugsgrößen angesprochen.

Aus dem Lösungsansatz lässt sich eine praktikable Reihenfolge der Einzelschritte ableiten. Diese wird schließlich zu einem Vorschlag für den Bewertungsablauf zusammengefasst und erläutert.

### **4.2 Zielsetzung**

#### **4.2.1 Aufgabenstellung**

Die zu entwickelnde Methodik soll eine vorausschauende vergleichende Nachhaltigkeitsanalyse von Baukonstruktionen erlauben. Ziel der Methodik ist es, eine Zahl gegebener Konstruktionsvarianten in einer Rangfolge zu ordnen, wobei diejenige Baukonstruktion, die den Nachhaltigkeitszielen am besten entspricht, an erster Stelle steht. Grundlage der Ordnung ist das Zielsystem des Nachhaltigen Bauens. Dieses wird durch ausgewählte Einzelkriterien repräsentiert, wobei die Kriterien der Ökobilanz und die Lebenszykluskosten als direkte lebenszyklusbezogene Größen eine wesentliche Rolle spielen. Bei der Bewertung ist insbesondere der unsichere Lebensweg der Konstruktion in Betracht zu ziehen. Die Bewertung der Einzelkriterien soll auf anerkannten Methoden für quantifizierbare Kriterien beruhen. In der Aggregation zu einem Gesamturteil sollen die Präferenzen des Entscheidungsträgers angemessen berücksichtigt werden.

Hauptergebnis bei der Anwendung der Methodik soll die Rangordnung der Bauwerksvarianten als Empfehlung für die weitere Planung darstellen. Daneben soll das Gesamtverständnis für das Problemfeld und die Wirkungszusammenhänge gefördert werden. Dem Entscheidungsträger sollen auch implizite Präferenzen bewusst werden, so dass er deren Einfluss auf die eigenen Entscheidungen reflektieren kann.

### 4.2.2 Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich der Methodik wird durch den Bewertungsgegenstand, den Zeitpunkt der Bewertung und den Adressatenkreis bestimmt.

Die Methodik wird allgemein für Baukonstruktionen entwickelt. Darunter werden in dieser Arbeit Komponenten, Bauteile und Bauteilgruppen verstanden, die bei Gebäuden oder Infrastrukturbauwerken eingesetzt werden. Die Erläuterungen und Beispiele in dieser Arbeit beziehen sich zur besseren Verständlichkeit schwerpunktmäßig auf Konstruktionen im Geschossbau. Eine Übertragung auf andere Bauwerksarten ist jedoch ohne weiteres möglich.

Die Methodik ist für die Variantenuntersuchung in der Planungsphase konzipiert. Sie unterstützt Entscheidungen, die von der Vorplanung bis zur Entwurfsplanung gefällt werden. Die Standortwahl wird als bereits abgeschlossen betrachtet und ist nicht Teil des Bewertungsverfahrens. Bewertungsgegenstand ist stets, wie oben angegeben, die Gebäudekonstruktion („*was* gebaut wird“), nicht der Planungs- oder Bauprozess als solches („*wie* gebaut wird“).

Die Methodik richtet sich zum einen an Bauherren, die eine möglichst nachhaltige Lösung für ein konkretes Bauvorhaben suchen, zum anderen ist sie auch im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten anwendbar. Beispielsweise können Konstruktionen optimiert und neuartige Lösungen mit herkömmlichen verglichen werden.

### 4.3 Lösungsansatz

Entsprechend der Aufgabenstellung (vgl. Abschnitt 4.2.1) lässt sich das Problem der prospektiven Nachhaltigkeitsanalyse von Baukonstruktionen mit unbekanntem Lebensweg in zwei Teilprobleme zerlegen (s. Tabelle 4-1). Die erste Teilaufgabe besteht in der Nachhaltigkeitsanalyse bei vorgegebenem Lebensweg. Obwohl bereits Systeme zur Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden existieren [wie z.B. das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude, BMVBS (2010)], können diese nicht direkt für die vorliegende Aufgabe verwendet werden, da sie jeweils auf spezielle Randbedingungen zugeschnitten sind. Es wird daher zunächst ein *kardinales Analyseverfahren* beschrieben. Mit Hilfe dieses Verfahrens kann bei bekanntem oder vorgegebenem Lebensweg eines Gebäudes die Erfüllung der Nachhaltigkeitsziele in Form

einer (einzigen) kardinalen Messgröße angegeben werden. Die zweite Teilaufgabe besteht in der Bewertung des ungewissen Lebenswegs. Da nach *Grünig & Kühn* (2006, S. 84) Entscheidungen unter Unsicherheit oder Ungewissheit die Verwendung von Szenarien erfordern, werden in diesem Teilverfahren verschiedene mögliche Lebenswege für das Gebäude erstellt. Auf jeden dieser Lebenswege kann das oben genannte kardinale Analyseverfahren angewendet werden. Ergebnis ist eine Bewertungsmatrix, die schließlich mit Methoden der Entscheidungsfindung unter Ungewissheit ausgewertet wird. Die Lösung dieser Teilaufgabe wird als *Verfahren zur Lebenszyklus-Szenarienbewertung* zusammengefasst. Basis der Bewertung ist die systematische und einheitliche Beschreibung des Gebäudes und seiner zeitlichen Entwicklung im Gebäude- und Lebenszyklusmodell. Beide Verfahren werden im Folgenden erläutert. Die adäquate Modellbildung folgt in Abschnitt 4.6. Schließlich wird der Bewertungsablauf zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Überblick über die Teilprobleme der entwickelten Methodik

Teilproblem	Lösungsansatz
Nachhaltigkeitsanalyse bei vorgegebenem Lebensweg	Kardinales Analyseverfahren
Bewertung des ungewissen Lebenswegs	Verfahren zur Lebenszyklus-Szenarienbewertung

## 4.4 Kardinales Analyseverfahren

### 4.4.1 Aufbau und Elemente des Verfahrens

Die Grundlage des kardinalen Analyseverfahrens zur Nachhaltigkeitsanalyse von Baukonstruktionen bilden das Leitbild „Nachhaltiges Bauen“ und die aus ihm abgeleiteten Nachhaltigkeitsziele. Die hierzu gehörigen Einzelkriterien sind in einem Kriterienkatalog zusammengefasst, der auf die jeweilige Aufgabenstellung der Analyse zugeschnitten ist. Bei der Kriterienbewertung sind zwei Bewertungsformen zu unterscheiden. Zum einen gibt es Kriterien, deren Bewertung in Form einer Minimalanforderung erfolgt und die damit zur Vorauswahl zulässiger Alternativen dienen. Zum anderen gibt es die Bewertungskriterien, die (quasi-)kardinal bewertet werden und zur Bildung einer Rangfolge der Alternativen herangezogen werden. Die Einzelergebnisse der Kriterien werden schließlich mit einem Verfahren der Multikriterienbewertung zu einem Gesamtergebnis zusammengeführt (Abbildung 4-1). Die Auswahl der Kriterien mit den zu ihrer Quantifizierung nötigen Bewertungsmethoden wird in den folgenden beiden Abschnitten dargestellt. In Abschnitt 4.4.4 wird dann ein Vorgehen zur Multikriterienbewertung vorgeschlagen.

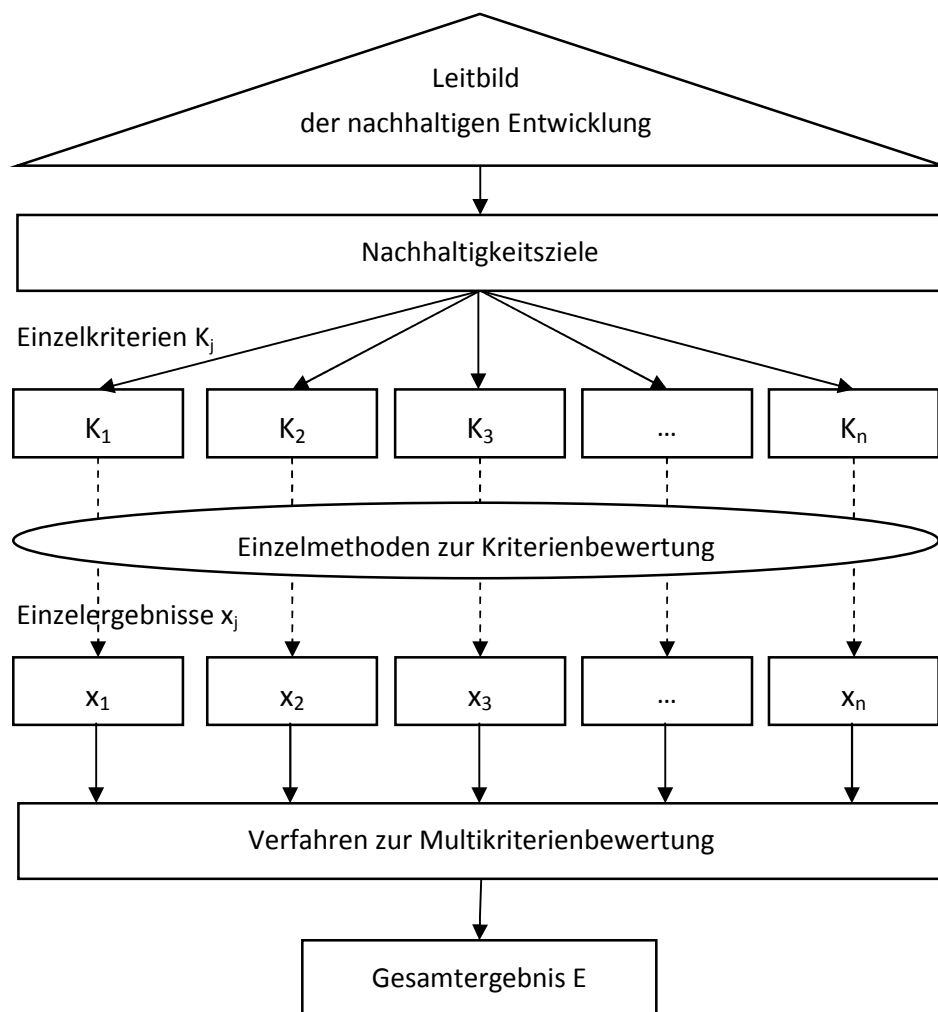


Abbildung 4-1: Elemente des kardinalen Analyseverfahrens

### 4.4.2 Kriterienauswahl

#### 4.4.2.1 Nachhaltigkeitsziele

Für das kardinale Analyseverfahren sind die Nachhaltigkeitskriterien ausgehend von den Nachhaltigkeitszielen auszuwählen. Die Nachhaltigkeitsziele leiten sich aus dem Leitbild der Nachhaltigen Entwicklung ab und wurden für das Bauen und Wohnen bereits formuliert. Für die vorliegende Arbeit werden vor allem die durch die Enquête-Kommission formulierten Ziele (Tabelle 2-1, S. 6) und die des HGF-Ansatzes (Anhang A) herangezogen, sofern zu ihnen auf Ebene der Gebäudeplanung ein wesentlicher Beitrag geleistet werden kann. Im Vergleich mit den genannten Ansätzen entfallen vor allem solche Ziele, die im Einflussbereich der Regional- und Stadtplanung liegen, z.B. die Vernetzung von Wohnen, Arbeiten und Freizeit in der Siedlungsstruktur oder die soziale Integration.

Für die Zuordnung geeigneter Kriterien wurde der umfangreiche Kriterienkatalog des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) als Ausgangspunkt verwendet. Da jedoch die Analyse von Baukonstruktionen einen enger gesteckten Rahmen bietet als die Zertifizierung von Gebäuden, kann der Katalog gestrafft werden. Maßgebend für die Auswahl ist die Vorgabe, dass der Katalog aus direkten, gebäudebezogenen, nach Möglichkeit kardinalen Kriterien bestehen soll. Aus diesem Grund werden solche Ziele ausgeklammert, die über prozessbezogene Kriterien adressiert werden, z.B. Ziele, die den Bausektor als Arbeitsmarkt oder die gesellschaftliche Partizipation bzw. Öffentlichkeitsbeteiligung betreffen.

Im Folgenden wird einzeln dargelegt, welche Ziele für die Nachhaltigkeitsanalyse von Baukonstruktionen von Bedeutung sind und durch welche Kriterien sie abgebildet werden können.

### 4.4.2.2 Wirkungen von Emissionen

Das Themengebiet Emissionen wurde bereits von der Enquête-Kommission mit dem Ziel „Verringerung der Emissionen und des Abfallaufkommens“ erkannt. Im BNB-System wird es durch die Kriteriengruppe „Wirkungen auf die globale Umwelt“ repräsentiert. Die nach dem HGF-Ansatz zugrunde gelegte Regel lautet, dass die Freisetzung von Stoffen die Aufnahmefähigkeit der Umweltmedien und Ökosysteme nicht überschreiten darf. Das heißt, Emissionen sind auf ein unschädliches Maß zu reduzieren. Das Nachhaltigkeitsziel wird daher auch häufig durch Teilziele wie Klimaschutz, Schutz der Ozonschicht, geringe Belastung von Erde, Wasser und Luft, etc. ausgedrückt.

Der Anteil des Bauens und Wohnens an den deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen beträgt inklusive Vorleistungsketten 37% [Coenen & Grunwald (2003, S. 161)]. Dabei werden direkte Treibhausgasemissionen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe zu Heizzwecken verursacht und zusätzlich indirekte Emissionen im Zuge der Energiebereitstellung und Produktion von Baustoffen. Hervorzuheben sind hierunter insbesondere die Kohlendioxidemissionen, die bei der Zementherstellung entstehen<sup>26</sup>. Durch eine Optimierung der Ökobilanz von Gebäuden kann daher ein wesentlicher Beitrag zum Teilziel „Klimaschutz“ geleistet werden. Hingegen ist das Optimierungspotential bezüglich des Schutzes der Ozonschicht gering, denn „die Bauindustrie verwendet nur noch sehr geringe Mengen von die Ozonschicht abbauenden Substanzen als Kältemittel,

---

<sup>26</sup> Die Zementindustrie setzt weltweit fünf Prozent des ausgestoßenen Kohlendioxids frei [Spiegel (2008)]. Die deutsche Zementindustrie arbeitet aktiv an der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Effizienzsteigerungen und Substitution von Brennstoffen, Zementrohstoffen und Zement [Arge Zementindustrie (2002, S. 26–31)].

mit abnehmender Tendenz“ [Jörissen et al. (2005, S. 151)]<sup>27</sup>. Der Beitrag der Gebäude zu anderen Emissionen erfolgt hauptsächlich durch Energienutzung in den Vorketten. Das Risiko direkter Emissionen von Baustoffen, die lokal eine Belastung von Erde, Wasser und Luft hervorrufen können, ist nur bei bestimmten Materialien bzw. Inhaltsstoffen vorhanden, z.B. Schwermetalle, organische Lösungsmittel [BMVBS (2009c, S. 1.1.6/1-4)].

Als Kriterien zum Themengebiet „Emissionen“ werden die anerkannten Wirkungskategorien der Ökobilanz (GWP, ODP, AP, EP, POCP) und das Kriterium „Risiken für die lokale Umwelt“ aus dem BNB-System herangezogen. Andere Nachhaltigkeitsbewertungssysteme enthalten teilweise zusätzlich das Kriterium „Abfall“. Die Auswirkungen, die durch den Transport, die Behandlung und gegebenenfalls Deponierung von Abfall entstehen, werden jedoch bei einer vollständigen Ökobilanz erfasst. Aus diesem Grund ist das Abfallaufkommen nicht Teil des Kriterienkatalogs. Die Kriterien GWP, ODP, AP, EP und POCP werden kardinal über den ganzen Lebenszyklus inklusive aller Vorketten im Rahmen der Ökobilanz bewertet. Hierzu stehen Datenbanken mit einer Vielzahl von Baustoff- und Energieprofilen zur Verfügung [Ökobau.dat BMVBS (2009b), GaBi 4 (2007), Ecoinvent (2010)]. Das Kriterium „Risiken für die lokale Umwelt“ wird in Anlehnung an den Steckbrief 1.1.6 des BNB-Systems bewertet [BMVBS (2009c, S. 1.1.6/1 ff)], wobei das „Qualitätsniveau 1“ des Steckbriefs entfällt. Hierin wird lediglich die Dokumentation relevanter Materialien gefordert, was eine rein prozessbezogene Bewertung darstellt. In den weiteren Qualitätsstufen werden steigende Anforderungen an Inhaltsstoffe der verwendeten Produkte gestellt. Diese betreffen z.B. Lösemittel in Klebern, Stabilisatoren in Kunststoffen oder Pigmente in Lacken. Hierzu ist anzumerken, dass nur bei einer hohen Planungstiefe eine Unterscheidung zwischen vorteilhaften und weniger vorteilhaften Varianten möglich ist.

##### **4.4.2.3 Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen**

Die Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen stellt ein entscheidendes Problem der Nachhaltigen Entwicklung dar, wobei im Bauwesen sowohl die energetischen Ressourcen als auch die mineralischen Ressourcen von Bedeutung sind. Im Enquête-Bericht werden hierzu die Ziele „Reduzierung der Ressourcenentnahme“ und „Begrenzung und Reduzierung des Verbrauchs nicht erneuerbarer Energieträger“ genannt [Dt. Bundestag (1998)]. Aus normativer Sicht stellt die Nutzung der endlichen Ressourcen ein Dilemma an sich dar, da einerseits jede Rohstoffentnahme die nachfolgenden Generationen benachteiligt, ein Entnahmeverbot andererseits bereits die heutige Generation beschränkt. Ein vermittelndes Ziel bei der Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen wird darin

---

<sup>27</sup> Laut Statistischem Bundesamt (2006, S. 8) entfielen 2004 von deutschlandweit 9364 t R11-Äq. nur 17 t auf das Baugewerbe.

gesehen, dass die Reichweite der nachgewiesenen Ressourcen über die Zeit zu erhalten ist [Jörissen et al. (2005, S. 125–126)].

Die tatsächliche Reichweite der nicht erneuerbaren **energetischen Ressourcen** (Erdöl, Erdgas, Kohle, etc.) ist in der Fachwelt umstritten, unter anderem aufgrund unterschiedlicher Annahmen bezüglich der Explorations- und Fördertechnik [Jörissen et al. (2005, S. 126–127)]. Sehr wahrscheinlich jedoch werden die fossilen Energieträger schon in naher Zukunft nicht mehr in dem Maße bzw. nur mit größerem technischem und wirtschaftlichem Aufwand verfügbar sein als heute. Die kontinuierliche Senkung des Energiebedarfs zählt daher zu den wichtigen Zielen der nachhaltigen Entwicklung. Allein der Energiebedarf für die Raumbeheizung macht 20% der benötigten Primärenergie in Deutschland aus [Tzscheuschler, Nickel, et al. (2009, S. 14)]. Das Ziel wird durch zwei Kriterien, nämlich den Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen und den Gesamtprimärenergiebedarf, abgebildet. Ersterer ist ein direktes Maß für die Schonung der nicht regenerativen Energieträger. Er kann durch effizientere Energienutzung sowie durch die Substitution mit erneuerbaren Energien gesenkt werden. Der Gesamtprimärenergiebedarf hingegen ist ein Maß für eine insgesamt effizientere Energienutzung. Er ergänzt das erste Kriterium, um zu verhindern, dass Einsparungen an nicht erneuerbaren Energieträgern durch Verschwendung regenerativer Energieträger überkompensiert werden. Der Primärenergiebedarf (nicht erneuerbar/gesamt) wird kardinal im Rahmen der Ökobilanz bestimmt.

Zu den im Baubereich verwendeten **mineralischen Ressourcen** zählen vor allem Sand, Kies, Tonstein, Kalkstein, Naturstein, Gipsstein und Feldspat, aber auch Eisen-, Aluminium- und Kupfererze. Trotz in der Regel großer Reichweite dieser Rohstoffe, gilt auch hier das Sparsamkeitsprinzip, wie von Jörissen et al. (2005, S. 137) dargestellt wird: „Der größte Teil dieser Rohstoffe ist, in geologischen Dimensionen gesehen, weit verbreitet. Allerdings ist ihr Vorkommen oft lokal oder regional begrenzt, und die Gewinnung der Rohstoffe steht häufig in Konflikt mit anderen Nutzungen wie Landwirtschaft, Wasserschutz oder Naturschutz. Außerdem sind Abbau, Transport und Verarbeitung der Rohstoffe mit Umweltbeeinträchtigungen und Energieverbrauch verbunden. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint es sinnvoll, solche Rohstoffe insgesamt möglichst sparsam in Anspruch zu nehmen.“ Es böte sich an, dieses Kriterium im Rahmen der Ökobilanz mit einem entsprechenden Indikator zu beurteilen, um den Rohstoffbedarf über den ganzen Lebenszyklus mit allen Vorketten zu erfassen. Trotz aktueller Anstrengungen, einen solchen Indikator „Abiotischer Ressourcenbedarf“ zu entwickeln, besteht derzeit noch kein Konsens [van Oers et al. (2002)]. Das Kriterium wird daher für das allgemeine Bewertungsverfahren vorerst zurückgestellt. Es kann im Rahmen der Ökobilanz jederzeit ergänzt werden, sobald die entsprechenden Basisdaten verfügbar sind.



### 4.4.2.4 Nutzung erneuerbarer Ressourcen

Die nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen zählt zu den Grundprinzipien der nachhaltigen Entwicklung. Das Ziel besteht darin, die Nutzungsrate so zu begrenzen, dass die Regenerationsrate nicht überstiegen wird [Dt. Bundestag (1998), Jörisen et al. (2005, S. 104)]. Wesentliche erneuerbare Ressourcen, die durch die Nutzung des Gebäudes beansprucht werden, sind Frischwasser und der Boden. Des Weiteren ist der nachwachsende Rohstoff **Holz** in seiner Verwendung als Baumaterial hervorzuheben. In der Forstwirtschaft Mitteleuropas ist das Prinzip der Nachhaltigkeit fest verankert<sup>28</sup>, doch global zählt die Zerstörung borealer, subtropischer und tropischer Wälder gegenwärtig zu den größten Problemen der nachhaltigen Entwicklung. Der Beitrag des Bauens zur Lösung dieses Problems kann jedoch nur prozessbezogen bewertet werden, denn entscheidend ist nicht die Art und Menge des verwendeten Holzes, sondern dessen Herkunft<sup>29</sup>. Nach dem Beispiel des Steckbriefs 1.1.7 des BNB besteht ein geeignetes prozessbezogenes Kriterium darin, inwiefern bei Ausschreibung und Vergabe eine unbedenkliche Herkunft des verwendeten Holzes sichergestellt wird [BMVBS (2009c, S. 1.1.7)]. Da die vorgestellte Methodik jedoch keine prozessbezogenen Nachhaltigkeitskriterien umfasst, wird die nachhaltige Nutzung der Ressource Holz hier ausgeklammert. Sie ist auch für die Analyse von Baukonstruktionen weniger relevant, da für eine Konstruktion stets im Nachhinein zwischen Holz aus unterschiedlichen Quellen gewählt werden kann.

Im Hinblick auf die erneuerbaren Ressourcen stellt die Verknappung von Süßwasser weltweit gesehen ein wachsendes Problem dar. In Deutschland ist die Bewirtschaftung der Ressource **Wasser** im Ganzen gesehen zwar als nachhaltig einzustufen, dennoch sind die Wasserressourcen in einzelnen Regionen bereits erheblich übernutzt. Schon heute treten in Trockenperioden regional Engpässe auf, so dass es auch für ein wasserreiches Land angebracht erscheint, mit dieser Ressource schonend umzugehen [Jörisen et al. (2005, S. 119–121)]. Der *Frischwasserbedarf* für Gebäude lässt sich in der Planung durch wassersparende Armaturen, Systemoptimierung und den Einsatz von Regen-/Grauwasser reduzieren. Er wird kardinal bewertet, wobei nur der Verbrauch durch die Nutzer (Nutzungsphase) einbezogen wird. Messgröße ist das benötigte Trinkwasservolumen.

---

<sup>28</sup> Aus der Forstwirtschaft stammt auch der Begriff „Nachhaltigkeit“. Seine erste Erwähnung im 17. Jahrhundert wird Berghauptmann von Carlowitz zugeschrieben, der in seinem Werk „Sylvicultura Oeconomica“ [von Carlowitz, Irmer & Grober (2000)] von der „beständigen und nachhaltenden Nutzung der Wälder“ sprach.

<sup>29</sup> Neben dem Ausschluss von Hölzern aus unkontrolliertem Raubbau ist auch die Verwendung von Hölzern aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern zielführend, da sie einen ökonomischen Anreiz zum Erhalt der Waldgebiete schafft [BMVBS (2009c, S. 1.1.7/1–2)].

Zunächst wird der Wasserbedarf für sanitäre Einrichtungen (vgl. z.B. VDI 6024 Blatt 1) ermittelt. Der Trinkwasserbedarf ergibt sich aus dem Wasserbedarf nach Abzug des Anteils, der durch Regenwasser oder Grauwasser gedeckt wird.

Die anhaltend hohe **Flächeninanspruchnahme** für Siedlungs- und Verkehrszwecke stellt ein großes Defizit für eine nachhaltige Entwicklung dar. Die Umwandlung von naturnahen Flächen beeinträchtigt die ökologische Funktion des Bodens (Puffer- und Filterkapazität, Regulierung des Wasserhaushalts, etc.) und geht mit Zersiedelung und Landschaftszerschneidung einher [Jörissen et al. (2005, S. 105–106), BMVBS (2009c, S. 1.2.4/1)]. Lässt man die Standortwahl für das Gebäude, wie im Anwendungsbereich (Abschnitt 4.2.2) dargelegt, außen vor<sup>30</sup>, so kann im Rahmen der Gebäudeplanung vor allem durch eine möglichst geringe Versiegelung des Bodens positiv eingewirkt werden. Die Flächeninanspruchnahme wird kardinal bewertet und bezieht sich allein auf die Inanspruchnahme auf dem Grundstück während der Nutzungsphase. Für die Bewertung wird die durch das Gebäude und die auf dem Grundstück befindlichen Außenanlagen versiegelte Fläche ermittelt und die Differenz zur versiegelten Fläche während der Vornutzung gebildet. Messgröße ist die Fläche des zusätzlich versiegelten Bodens.

#### 4.4.2.5 Generationenübergreifendes Wirtschaften

Im Bereich der ökonomischen Nachhaltigkeitsziele werden durch die Enquête-Kommission Ziele aufgezählt, die sich unter dem Begriff generationenübergreifendes Wirtschaften zusammenfassen lassen [Dt. Bundestag (1998)]. Diese Ziele lenken den Blick von kurzfristigen, akteursbezogenen Überlegungen auf langfristige Kostenoptimierungen und langfristigen Werterhalt. Darüberhinaus gibt es ökonomische Zielstellungen mit gesellschaftlichem Bezug, wie z.B. Ausgleich extremer Einkommens- und Vermögensunterschiede oder erträgliche Ausgaben für Wohnen auch für Gruppen geringeren Einkommens. Diese werden hier nicht betrachtet, da sie nicht im Einflussbereich der Baukonstruktionsplanung liegen.

Zum einen erfordert ein generationenübergreifendes Wirtschaften die Optimierung der finanziellen Belastungen für Bau, Betrieb, Änderung und Abriss insgesamt. Das Kriterium wird durch die **Lebenszykluskosten** kardinal bewertet. Sie setzen sich aus Planungskosten, Herstellkosten, Nutzungskosten, Kosten für bauliche Änderungen, Abbruchkosten und Entsorgungskosten zusammen. Falls Alternativen mit unterschiedlich langem Lebenszyklus verglichen werden sollen, ist als Indikator die Annuität zu

---

<sup>30</sup> Die Standortwahl stellt für die Flächeninanspruchnahme den maßgebenden Faktor dar. Durch „Flächenrecycling“ kann z.B. belasteter Boden ehemaliger Industriegelände ökologisch aufgewertet werden. Bauen „auf der grünen Wiese“ stellt hingegen eine Verschlechterung dar, insbesondere auch durch den induzierten Flächenbedarf für zusätzliche Infrastruktur.

verwenden. Ansonsten ist auch der Barwert der Lebenszykluskosten ein geeigneter Indikator. Da im Rahmen der Lebenszykluskostenanalyse zum Teil Lücken bei der detaillierten Berücksichtigung von Kosten für **Reinigung und Instandhaltung** bestehen, wird hierfür ersatzweise ein Rating herangezogen. Die Bewertung richtet sich nach dem Steckbrief 4.1.3 des BNB-Systems und kann entfallen, wenn der Aufwand im Rahmen der Lebenszykluskostenanalyse adäquat berücksichtigt wird [BMVBS (2009c, S. 4.1.3/1ff)].

Zum anderen bedeutet generationenübergreifendes Wirtschaften den Erhalt des Sachkapitals, das in den Bauwerken verkörpert ist. Am gesamten deutschen Anlagevermögen hatten Bauten im Jahr 2009 mit 11.137,71 Mrd. Euro (Wiederbeschaffungspreis brutto) einen Anteil von rund 85% [Statistisches Bundesamt (2009d, S. 647)]. Die nachhaltige Entwicklung dieses Sachkapitals erfordert nicht einfach den Erhalt der Bausubstanz sondern seine kontinuierliche Anpassung an die jeweiligen Bedürfnisse der Gesellschaft. Aus Bauherrensicht wird eine positive **Wertentwicklung** für das Gebäude angestrebt. Die Wertentwicklung als Kriterium kann jedoch nicht vorausschauend bewertet werden. Die bestehenden Verfahren zur Wertermittlung sind nicht auswertbar, da der Wert nicht nur von der Bausubstanz sondern auch den zukünftigen Gegebenheiten des Marktes beeinflusst wird. Indirekt kann von einer guten Wertermittlung ausgegangen werden, wenn das Marktänderungsrisiko bewältigt werden kann, d.h. das Gebäude auf künftige Anforderungen reagieren kann. Ein solches indirektes Kriterium liegt beispielsweise im BNB-System mit der Drittverwendungsfähigkeit vor. In der vorliegenden Arbeit sollen solche indirekten Kriterien jedoch nicht betrachtet werden. Stattdessen sollen das Änderungsrisiko und die konkrete Reaktion des Bauwerks in Szenarien abgebildet werden. Die Vorteile einzelner Konstruktionsvarianten zeigen sich dann in einem geringeren Anpassungsaufwand. Denkbar ist es auch, im Rahmen der Szenarienbewertung die Marktgängigkeit der Varianten über die erzielbaren Mieteinnahmen zu modellieren. In Anlehnung an den Ertragswert wird dann die diskontierte Summe der Mieteinnahmen als Kriterium herangezogen. Dies entspricht einer Ausweitung der Lebenszykluskostenbetrachtung in Richtung eines Whole Life Costing.

### 4.4.2.6 Gesundheit

Der Schutz der menschlichen Gesundheit zählt zu den wesentlichen Zielen einer nachhaltigen Entwicklung. Für den Baubereich wurde dieses Ziel im Enquête-Bericht als „Gesundes Wohnen innerhalb wie außerhalb der Wohnung“ formuliert [Dt. Bundestag (1998)].

Als Problemfelder werden von Jörissen *et al.* (2005, S. 46) beim Bauen und Wohnen die Innenraumbelastung sowie Verkehrslärm identifiziert. Zwar sind darüber hinaus Fragen

des Arbeits- und Gesundheitsschutzes für das Bauen relevant<sup>31</sup>, doch werden diese hier ausgeklammert, da sie sich nicht durch bauwerksbezogene Kriterien, sondern vielmehr durch prozessbezogene Kriterien bewerten lassen.

Eine **Belastung der Innenraumluft** kann durch externe Schadstoffquellen (belastete Außenluft), durch nutzerbedingte Schadstoffquellen (z.B. Tabakrauch), durch Einrichtungsgegenstände, durch baubedingte Schadstoffquellen (Baustoffe, Schimmel) sowie bei Hygieneproblemen in Lüftungsanlagen entstehen [Coenen & Grunwald (2003, S. 162–163)]. Auf die beiden letztgenannten Punkte kann bei der Planung von Gebäuden Einfluss genommen werden. Die vorhandenen Belastungen infolge VOC-Emissionen aus Baustoffen, mikrobiologischer Probleme („Schimmel“) sowie Hygieneprobleme in Lüftungsanlagen können in der Nutzungsphase nur durch Messungen vor Ort genau bestimmt werden. Dem Problem kann jedoch durch richtige Planung und Auswahl der Bauprodukte vorgebeugt werden [BMVBS (2009c, S. 3.1.3/1–2), Bellmer (o.J., S. 1)]. Es ist daher vorgesehen, das Kriterium als Mindestanforderung zu behandeln. Bei der Bewertung des Kriteriums ist zu prüfen, ob nach einschlägigen Regeln konstruiert wurde. Dies betrifft z.B. die Auswahl emissionsarmer Produkte nach *AgBB* (2010), vorbeugende bauliche Maßnahmen gegen Schimmelpilzbildung nach dem „Schimmelpilzleitfaden“ UBA (2002)<sup>32</sup> und die Planung der Lüftungsanlagen nach VDI 6022 Blatt 1 [Keune (2008)].

Beim Verkehrslärm handelt es sich aus Sicht der Gebäudeplanung um eine externe Lärmquelle, die eine Belastung für die Nutzer darstellt. Gleichzeitig ist das Gebäude Mitverursacher von Lärm, denn durch die Gebäudenutzung wird (zusätzlicher) Verkehr induziert. Grundlegende Lösungen sind auf Ebene der Regional- und Stadtplanung zu suchen [Coenen & Grunwald (2003, S. 157–158)]. Auf Ebene der Gebäudeplanung wird der Verkehrslärm als unbeeinflussbare Größe betrachtet, dem durch passive Schallschutzmaßnahmen entgegengewirkt werden muss. Im Kriterium **Schallschutz** ist daher die Planung der baulichen Schallschutzmaßnahmen zu bewerten. Als Mindestanforderung zählt die Einhaltung von DIN 4109. Der Mindestschallschutz ist vor allem unter gesundheitlichen Gesichtspunkten als Kriterium heranzuziehen. Darüber hinaus ist der Schallschutz von hoher Bedeutung für die Nutzerzufriedenheit. Unter diesem Gesichtspunkt ist das Kriterium durch ein Rating zu einem quasi-kardinalen Kriterium mit strengeren Anforderungen, wie denen der Schallschutzstufen nach VDI

---

<sup>31</sup> Im Jahr 2009 gab es laut *BGBau* (2010, S. 2) 115.177 Arbeitsunfälle und 9.477 Anzeigen auf Verdacht einer Berufskrankheit.

<sup>32</sup> Zum Stand der Technik bei der Schimmelpilzvorbeugung zählen vor allem der Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2, der Schutz gegen Schlagregen nach DIN 4108-3, gegen aufsteigende Bodenfeuchte nach DIN 18195, eine regelgerechte Dachkonstruktion und wasserdichte Installationen. [UBA (2002, S. 16)]

4100 zu erweitern [Kötz (2000)]. Der Schallschutz zählt ferner zu den Kriterien, bei denen Reserven für den späteren Lebensweg möglich sind. So können manche Baukonstruktionsvarianten einen höheren Schallschutz bieten, als zum Zeitpunkt der Planung erforderlich wäre. Diese Reserve kann sich als vorteilhaft erweisen, wenn zu einem späteren Zeitpunkt die Schallschutzanforderungen, z.B. wegen einer Nutzungsänderung, verschärft werden. In der hier vorgestellten Methodik ist es jedoch ausdrücklich nicht vorgesehen, derartige Reserven pauschal zu bewerten. Stattdessen sollen sie bei der Szenarienbildung und -bewertung berücksichtigt werden, indem für jedes Szenario geprüft wird, ob sich gegenüber anderen Baukonstruktionsvarianten Vorteile ergeben.

### 4.4.2.7 Risikovorsorge

Zu den Zielen einer Nachhaltigen Entwicklung im Bereich des Bauens zählt es auch, Risiken für Mensch und Umwelt zu minimieren und durch die Baukonstruktion weitgehende Sicherheit auch bei Eintritt von Unfällen oder Katastrophen zu bieten [BMVBS (2009c, S. 3.1.8/1)]. Als Gefährdungsquellen sind Erdbeben, Hochwasser und Brand zu nennen.

Erdbeben zählen zu den nicht vorhersehbaren Naturkatastrophen, deren Bedeutung in Deutschland jedoch vergleichsweise gering ist. Die Erdbebengefährdung eines Gebäudes ist abgesehen von der Standortwahl nicht beeinflussbar, so dass sich Strategien im Bereich der Gebäudeplanung auf die Schadensvermeidung beschränken. Für den **Erdbebenschutz** wird als Mindestkriterium vorausgesetzt, dass die Standsicherheit des Gebäudes nachgewiesen wird, und eine Gefährdung von Menschen durch herabstürzende Bauteile ausgeschlossen werden kann. Das Kriterium ist nur für Gebäude in Erdbebenzonen anzuwenden. [DIN EN 1998-1]

Eine erfolgreiche Strategie zur Minimierung von Hochwasserschäden setzt ein großräumiges Flächenmanagement (Retentionsräume) und die Vermeidung von Bauten in besonders hochwassergefährdeten Gebieten voraus [Jörissen et al. (2005, S. 159)]. Ansätze zur Lösung des Problems liegen daher vor allem auf regionalplanerischer Ebene. Auf Ebene der Gebäudeplanung sind die Einflussmöglichkeiten limitiert auf die Vermeidung größerer Schäden im Katastrophenfall. In der Regel wird das Kriterium **Hochwasserschutz** im Sinne einer Mindestanforderung bewertet. Die Anforderungen bemessen sich nach der Hochwassergefährdung am Standort und sollen durch die Einhaltung der technischen Baubestimmungen die Standsicherheit des Bauwerks gewährleisten. Das Kriterium kann jedoch auch zu einem Rating erweitert werden, in dem berücksichtigt wird, wie groß der materielle Schaden werden kann. Ungünstig ist in diesem Zusammenhang, wenn in überflutungsgefährdeten Kellern empfindliche Nutzungen (Haustechnik, Archive, Tiefgaragen, etc.) oder wasserempfindliche

Materialien vorgesehen sind. Der Hochwasserschutz zählt zu den Kriterien, bei denen Baukonstruktionen Reserven aufweisen können. Mit Szenarien kann hier untersucht werden, wie schadenstolerant verschiedene Konstruktionsvarianten im Katastrophenfall sind und wie groß der jeweilige Instandsetzungsaufwand wäre.

Brände verursachen in Deutschland jedes Jahr Todesfälle, Verletzungen und materielle Schäden<sup>33</sup>. Der **Brandschutz** spielt eine wichtige Rolle in der Bauplanung und wird in MBO § 14 gesetzlich eingefordert. Als Mindestvoraussetzung für dieses Kriterium wird daher die Einhaltung der technischen Baubestimmungen angesehen. Darüber hinaus ist ein Rating in Anlehnung an Steckbrief 3.1.8 vorgesehen [BMVBS (2009c, S. 3.1.8/1ff)]. Hier wird positiv bewertet, wenn Baustoffe gemieden werden, die ätzende oder zersetzende Brandgase verursachen, und wenn Fluchtwege die gesetzlichen Anforderungen übererfüllen, d.h. insbesondere für Menschen mit körperlichen Beeinträchtigungen geeignet sind. Die positive Bewertung von Evakuierungsplänen entfällt für den vorliegenden Kriterienkatalog, da es sich um eine prozessbezogene Bewertung handelt. Beim Kriterium Brandschutz können Baukonstruktionen Reserven besitzen, etwa wenn sie einen besseren Brandschutz aufweisen, als es die geplante Nutzung erfordert. Eine solche Übererfüllung wird zunächst nicht bewertet. Im Rahmen der Szenarienanalyse wird sie jedoch sichtbar, wenn im Lebenszyklus erhöhte Brandschutzanforderungen, etwa infolge Nutzungsänderungen, auftreten. Die Konstruktionsvarianten unterscheiden sich dann hinsichtlich des Nachrüstungsaufwands. Darüber hinaus wäre es denkbar, die Restnutzbarkeit nach einem Brandereignis durch Szenarien zu erfassen. Die Aussagekraft einer solchen Analyse hängt jedoch davon ab, inwiefern der Schaden für unterschiedliche Brandausmaße im Detail vorherzusagen ist, und wie die Eintrittswahrscheinlichkeit der Brandszenarien einzuschätzen ist.

### 4.4.2.8 Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit

Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit können als Ziele einer Nachhaltigen Entwicklung im Bereich des Bauens betrachtet werden da sie einerseits zur Verbesserung der Lebensqualität beitragen und andererseits Voraussetzung für eine langanhaltende Nutzung des Gebäudes sind (vgl. Abschnitt 2.5). Die Behaglichkeit in Gebäuden wird maßgeblich durch die thermisch-hygrischen, akustischen und visuellen Umstände im Raum bestimmt. Eine hohe Nutzerzufriedenheit hängt jedoch nicht nur davon ab, inwiefern objektive Behaglichkeitskriterien eingehalten sind, sondern auch davon, ob der Nutzer Einfluss auf die Raumbedingungen nehmen kann. Außerdem trägt das subjektive Sicherheitsempfinden zur Behaglichkeit bei.

---

<sup>33</sup> Im Jahr 2009 kamen laut *Statistischem Bundesamt* (2010) 433 Menschen durch Brände ums Leben, die Mehrzahl hiervon nicht durch Verbrennungen, sondern durch Brandgase.

Die Kriterien zu diesem Themenbereich werden aus dem BNB-System übernommen. Die Bewertung des *thermischen Komforts* im Winter bzw. im Sommer erfolgt in Form eines Ratings nach dem Steckbrief 3.1.1 bzw. 3.1.2. Die Bewertung des *akustischen Komforts* erfolgt ebenfalls als quasi-kardinales Rating nach Steckbrief 3.1.4. Ein ausreichender Schallschutz ist dabei Voraussetzung für akustisches Wohlbefinden und wird im Themenblock „Gesundheit“ geprüft. Der *visuelle Komfort* wird nach Steckbrief 3.1.5 bewertet, die *Einflussnahmemöglichkeiten* der Nutzer werden nach Steckbrief 3.1.6 bewertet. Das subjektive *Sicherheitsempfinden* wird nach Steckbrief 3.1.8 bewertet. Dabei wird jedoch nicht in die Bewertung einbezogen, ob ein Pförtner erreichbar ist, da es sich hierbei um ein prozessbezogenes Kriterium handelt. Die Aufenthaltsmerkmale im Außenraum werden nicht als Kriterium herangezogen, da sie durch die Baukonstruktion nicht beeinflusst werden. [BMVBS 2009c]

### 4.4.2.9 Grundbedürfnisse

Die Befriedigung der Grundbedürfnisse zählt zu den Zielen der Nachhaltigen Entwicklung und das Bauen leistet hierzu einen wesentlichen Beitrag. Von Jörissen et al. (2005, S. 59) werden hier die Problemfelder Wohnungslosigkeit, Wohnraumversorgung, Chancengleichheit am Wohnungsmarkt sowie die Gewährleistung zumutbarer, gesunder und sicherer Wohnverhältnisse angesprochen. Es handelt sich mehrheitlich um gesellschaftliche Probleme, die auf Ebene der Gebäudeplanung nicht zu lösen sind.

Einzig der letztgenannte Punkt fällt in den Bereich der Gebäudeplanung, denn durch Baukonstruktionen können *sichere und zumutbare Aufenthaltsräume* für Wohnen, Arbeiten und Freizeit gewährleistet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieses jedoch als Grundaufgabe des Bauens verstanden und das Kriterium als ein Mindestkriterium behandelt. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass ein Mindeststandard, zumindest im Neubau, durch die Einhaltung von gesetzlichen Anforderungen, Baubestimmungen und dem Stand der Technik gewährleistet wird<sup>34</sup>.

Eng mit der zuvor genannten Grundaufgabe des Bauens verbunden ist die Schaffung von Räumlichkeiten, die für die vorgesehene Nutzung grundsätzlich geeignet sind. Die *funktionale Eignung* des Entwurfs für die Bauaufgabe scheint zunächst eine derart triviale Anforderung, dass sie eigentlich nicht als Kriterium zu nennen wäre. Sie wird in der Regel auch als Mindestanforderung verstanden, die durch den Bauwerksentwurf sichergestellt ist. Jedoch können hier Baukonstruktionen Reserven besitzen, die sich im Falle einer Nutzungsänderung zeigen. Bei der Auswertung der Varianten in den Szenarien kann sich zum einen zeigen, dass ein größerer Aufwand nötig ist, um überhaupt ein

---

<sup>34</sup> Im Altbestand bestehen – auch in Deutschland – noch Defizite (z.B. Wohnungen ohne Bad, mit Einzelöfen, etc.) [Coenen & Grunwald (2003, S. 163–165)].

Grundmaß an funktionaler Eignung zu erreichen. Zum anderen kann es sein, dass trotz Umbaumaßnahmen nicht das gleiche Maß an Nutzungsqualität erreicht wird, z.B. weil tragende Stützen die Grundrissgestaltung einschränken. In diesem Fall ist das Kriterium mit einem Rating zu versehen. Der Bewertende legt hierzu Klassen fest, die die unterschiedliche funktionale Eignung der Baukonstruktionen für die einzelnen Nutzungsarten widerspiegeln. Das Kriterium wird in jedem Szenario für die entsprechend vorliegende Nutzung ausgewertet und bei wechselnden Nutzungsarten nach deren Anteil an der Nutzungszeit gewichtet.

Des Weiteren wird im Rahmen dieser Arbeit die **Barrierefreiheit** den Grundbedürfnissen zugeordnet, denn sie ist Voraussetzung für gleichberechtigte Teilhabe von Menschen mit und ohne Einschränkungen. Das Kriterium wird nach dem Steckbrief 3.2.1 des BNB-Systems bewertet [BMVBS (2009c)].

### 4.4.2.10 Kulturelle und soziale Ressourcen

Die kulturellen Ressourcen einer Gesellschaft können zum einen im kulturellen Erbe und zum anderen in der kulturellen Vielfalt gesehen werden. Kulturelle Vielfalt ist als Quelle der Kreativität ein wichtiger Entwicklungsfaktor zum Nutzen gegenwärtiger und künftiger Generationen [UNESCO (2001)]. Zusammen mit den sozialen Ressourcen, wie Toleranz, Solidarität und Gemeinwohlorientierung, trägt sie dazu bei, den sozialen Zusammenhalt der Gesellschaft zu erhalten. Möglichkeiten, im Rahmen der Gebäudeplanung ein positives Umfeld für diese kulturellen und sozialen Ressourcen zu schaffen, sind in begrenztem Umfang vorhanden. Zu den Defiziten zählen etwa eine Uniformierung der Innenstädte und eine Entwertung des öffentlichen Raums, die schließlich zu sozialer Desintegration und Segregation beitragen [Jörissen et al. (2005, S. 203–241)]. Die architektonische Gestaltung eines Gebäudes und seine Integration ins Quartier können entscheiden, ob ein Gebäude derartige Defizite verstärkt oder mildert. Als Kriterium wird die **architektonische und städtebauliche Qualität** herangezogen. Ein objektives Rating der architektonischen Qualität gestaltet sich in der Regel schwierig und ist nur im Zusammenhang mit der Aufgabenstellung möglich. Der Bewertende hat hierzu das Rating, soweit möglich, festzulegen. Bezüglich der Integration ins Quartier kann der Steckbrief 3.2.4 verwendet werden [BMVBS (2009c)].

Zur Erhaltung des kulturellen Erbes trägt im Bauwesen der Erhalt historischer baulicher Ensembles und Einzelbauten bei. Ausdruck der besonderen kulturellen Bedeutung ist die Einstufung als denkmalgeschützte bauliche Anlage, deren Zahl in Deutschland auf über 800.000 geschätzt wird [Vogdt (2002, S. 43)]. Als Kriterium für dieses Ziel wird im Bereich der Gebäudeplanung die Einhaltung von Denkmalschutzbestimmungen verwendet. Das Kriterium wird dabei als Mindestanforderung betrachtet. Sofern im Einzelfall Bestimmungen und Auflagen des **Denkmalschutzes** gelten, müssen diese von



allen Planungsvarianten erfüllt werden. Eine Bewertung von Übererfüllungen ist nicht vorgesehen. Wo keine Anforderungen an den Denkmalschutz bestehen, gilt das Kriterium als erfüllt, bzw. kann entfallen.

### 4.4.3 Kriterienkatalog

Die oben ausgewählten Nachhaltigkeitskriterien für das kardinale Analyseverfahren sind im Kriterienkatalog in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

Bei den Kriterien des Katalogs kommen unterschiedliche Bewertungsformen zur Anwendung. Ein Teil der Kriterien wird im Sinne einer Mindestanforderung bewertet. Zu deren Bewertung genügen nominale oder ordinale Merkmale<sup>35</sup>. Das festgelegte Anforderungsniveau ist obligatorisch. Nur die Alternativen, die den Anforderungen genügen, werden als zulässige Alternativen weiter betrachtet. Unterschreitungen der Mindestanforderungen führen zum Ausschluss, Übererfüllungen werden nicht gewertet, weil sie in Bezug auf das Nachhaltigkeitsziel keinen nennenswerten Vorteil bringen.

Die übrigen Kriterien erfordern eine kardinale Bewertung, da die später beschriebene Multikriterienbewertung auf kardinalen Einzelergebnissen beruht. Eine kardinale Bewertung ist mit den Methoden der Ökobilanz, Lebenszykluskostenrechnung, Flächenermittlung und Wasserbedarfsermittlung möglich. Bei den übrigen Kriterien, wo zunächst keine kardinale Messgröße vorliegt, wird ein Rating auf einer quasi-kardinalen Skala vorgenommen [Lillich (1992, S. 30), Schneeweiß (1992, S. 40–48)]. Ein Rating kann in der Mehrzahl der Fälle nach den Steckbriefen des BNB-Systems erfolgen.

---

<sup>35</sup> Vgl. Exkurs zu Kapitel 3.3.1

Tabelle 4-2: Kriterienkatalog des kardinalen Analyseverfahrens

Thema	Einzelkriterien	Bewertungsmethoden
Wirkungen von Emissionen	Treibhauspotential	Ökobilanz
	Ozonabbaupotential	
	Versauerungspotential	
	Überdüngungspotential	
	Bodennahe Ozonbildung	
	Risiken für die lokale Umwelt	Rating
Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen	Primärenergiebedarf n.e.	Ökobilanz
	Primärenergiebedarf gesamt	
Nutzung erneuerbarer Ressourcen	Frischwasserbedarf	Wasserbedarfsermittlung
	Flächeninanspruchnahme	Flächenermittlung
Generationenübergreifendes Wirtschaften	Lebenszykluskosten	Lebenszykluskostenrechnung
	Reinigung und Instandhaltung <sup>3</sup>	Rating
Gesundheit	Innenraumbelastung <sup>1</sup>	Qualitative Beurteilung
	Schallschutz <sup>1,2</sup>	ggf. Rating
Risikovorsorge	Erdbebenschutz <sup>1</sup>	Einhaltung der Baubestimmungen
	Hochwasserschutz <sup>1</sup>	
	Brandschutz <sup>1,2</sup>	Rating
Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit	Thermischer Komfort im Winter	Rating
	Thermischer Komfort im Sommer	Rating
	Akustischer Komfort	Rating
	Visueller Komfort	Rating
	Einflussnahmemöglichkeiten	Rating
	Sicherheitsempfinden	Rating
Grundbedürfnisse	Sichere, zumutbare Aufenthaltsräume <sup>1</sup>	Einhaltung Stand der Technik
	Funktionale Eignung <sup>1,2</sup>	Rating
	Barrierefreiheit	Rating
Kulturelle und soziale Ressourcen	Architektonische und städtebauliche Qualität	Rating
	Denkmalschutz <sup>1</sup>	Einhaltung von Auflagen
<sup>1</sup> Kriterium mit Mindestanforderung, kann zum Ausschluss einer Variante führen. <sup>2</sup> Kriterium kann Reserven im Lebenszyklus sichtbar machen. <sup>3</sup> Bewertung nur, sofern nicht im Kriterium Lebenszykluskosten erfasst.		

Um den Analyseaufwand im Rahmen der Aufgabenstellung möglichst gering zu halten, kann die Bewertung informell erfolgen. Umfangreiche Dokumentationen, wie in den Steckbriefen für die Zertifizierung vorgesehen, sind nicht erforderlich. Auch kann gegebenenfalls auf den expliziten Nachweis der Erfüllung von Mindestanforderungen verzichtet werden, wenn davon auszugehen ist, dass Baubestimmungen und Stand der Technik erfüllt werden.

Im Vergleich zum BNB-System ist der Kriterienkatalog bereits gestrafft worden, wie ein Vergleich mit Tabelle 4-3 zeigt. Eine weitere Kürzung wird je nach Aufgabenstellung möglich, da jeweils nur die relevanten Kriterien berücksichtigt werden müssen [Mag (1990, S. 19–20)]. Da die vorgestellte Methodik für vergleichende Nachhaltigkeitsanalysen konzipiert ist, ist ein Kriterium nur relevant, wenn die Varianten unterschiedliche Wirkungen hinsichtlich dieses Kriteriums entfalten. In dieser Hinsicht irrelevante Kriterien sind aus dem Kriterienkatalog zu entfernen. Insofern stellt der Kriterienkatalog aus Tabelle 4-2 den Ausgangspunkt für jede Aufgabenstellung dar, der individuell angepasst wird.

Tabelle 4-3: Vergleich mit dem Kriterienkatalog des BNB-Systems

Kriterien des BNB-Systems		Berücksichtigt?
<u>Ökologische Qualität</u>		
Wirkungen auf die globale Umwelt	Treibhauspotenzial	im Themenblock „Wirkungen von Emissionen“
	Ozonschichtzerstörungspotential	
	Ozonbildungspotential	
	Versauerungspotential	
	Überdüngungspotential	
	Risiken für die lokale Umwelt	
	Nachhaltige Materialgewinnung /Holz	im Themenblock „Nutzung erneuerbarer Ressourcen“
Ressourcen-inanspruchnahme	Primärenergiebedarf nicht erneuerbar	im Themenblock „Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen“
	Gesamtprimärenergiebedarf und Anteil erneuerbarer Primärenergie	
	Trinkwasserverbrauch und Abwasseraufkommen	im Themenblock „Nutzung erneuerbarer Ressourcen“
	Flächeninanspruchnahme	
<u>Ökonomische Qualität</u>		
Lebenszykluskosten	Gebäudebezogenen Kosten im Lebenszyklus	im Themenblock „Generationenübergreifendes Wirtschaften“
Wertentwicklung	Drittverwendungsfähigkeit	nein, da indirekte Wirkung

Fortsetzung von Tabelle 4.3

Kriterien des BNB-Systems		Berücksichtigt?
<u>Soziokulturelle und funktionale Qualität</u>		
Gesundheit, Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit	Thermischer Komfort im Winter	im Themenblock „Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit“
	Thermischer Komfort im Sommer	
	Innenraumlufthygiene	im Themenblock „Gesundheit“
	Akustischer Komfort	im Themenblock „Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit“
	Visueller Komfort	
	Einflussnahme des Nutzers	
	Aufenthaltsmerkmale im Außenraum	nein, da nicht konstruktionsbezogen
	Sicherheit und Störfallrisiken	in den Themenblöcken „Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit“ u. „Risikovorsorge“
Funktionalität	Barrierefreiheit	im Themenblock „Grundbedürfnisse“
	Flächeneffizienz	über Bezugsgröße
	Umnutzungsfähigkeit	Reserven indirekt über Szenarien
	Zugänglichkeit	im Themenblock „Kulturelle und soziale Ressourcen“
	Fahrradkomfort	nein, da nicht konstruktionsbezogen
Sicherung der Gestaltungsqualität	Planungswettbewerb	im Themenblock „Kulturelle und soziale Ressourcen“
	Kunst am Bau	nein, da prozessbezogen
<u>Technische Qualität</u>		
Qualität der technischen Ausführung	Schallschutz	im Themenblock „Gesundheit“
	Wärme- und Tauwasserschutz	nein, da indirekte Wirkung
	Reinigung und Instandhaltung	im Themenblock „Generationen-übergreifendes Wirtschaften“
<u>Prozessqualität</u>		nein, da prozessbezogen
<u>Standortmerkmale</u>		nein, da nicht konstruktionsbezogen

### 4.4.4 Multikriterienbewertung

#### 4.4.4.1 Verfahren

Anforderung an das Verfahren zur Multikriterienbewertung ist, dass es die Beurteilung von Konstruktionsalternativen hinsichtlich der relevanten Nachhaltigkeitsaspekte auf einer einzigen kardinalen Skala ermöglichen muss.

Hierfür wird die Nutzwertanalyse vorgeschlagen, die gegebenenfalls durch Elemente des AHP-Prozesses bzw. der TOPSIS-Methode ergänzt wird<sup>36</sup>. Voraussetzung für die Anwendung der Nutzwertanalyse ist, dass jedes Kriterium in einen Nutzwert auf einer einheitlichen Skala transformiert wird und dass Gewichtungsfaktoren für die Kriterien untereinander angegeben werden. Der Nutzwert gibt dabei den Erfüllungsgrad des Kriteriums von „voll“ bis „unzureichend“ wieder.

Die Gesamtbewertung für eine Konstruktionsalternative ergibt sich als gewichtetes Mittel der Nutzwerte aller Kriterien nach Gl. 3-2.

$$E = \sum_{j=1}^n x_j \cdot w_j \quad \text{Gl. 4-1}$$

mit E = Gesamtergebnis

$x_j$  = Nutzwert des Kriteriums  $j$

$w_j$  = Wichtung des Kriteriums  $j$

$n$  = Zahl der (quasi-)kardinalen Kriterien des Kriterienkatalogs

#### 4.4.4.2 Transformation in einen Nutzwert

Für jedes kardinal bewertbare Kriterium ist eine Nutzwertfunktion anzugeben, die den Indikator auf das Einheitsintervall abbildet. Kriterien mit positiver Wirkungsrichtung erfordern eine monoton steigende Nutzwertfunktion, denn für sie gilt: Je größer der Indikatorwert, desto besser die Erfüllung des Nachhaltigkeitsziels. Kriterien mit negativer Wirkungsrichtung erfordern dementsprechend eine monoton fallende Nutzwertfunktion. Die weitere Form der Nutzwertfunktion ist für das kardinale Analyseverfahren nicht fest vorgegeben sondern nach den jeweiligen Erfordernissen auszuwählen. Für Kriterien mit kontinuierlichem Wertebereich wird in der Regel eine stetige Nutzwertfunktion angebracht sein. Es sind jedoch auch unstetige Funktionen, wie z.B. Treppenfunktionen, denkbar, etwa wenn bei Überschreiten bestimmter Werte der Nutzen sprunghaft ansteigt.

---

<sup>36</sup> Die drei Methoden wurden in den Abschnitten 3.3.4 bis 3.3.6 beschrieben.

Im Folgenden soll eine Nutzwertfunktion vorgestellt werden, die für viele Kriterien zutrifft [Bamberg, Coenenberg & Krapp (2008, S. 79–81)]. Im unteren Wertebereich ist der Nutzwertzuwachs gering. Ab einem gewissen Punkt steigt der Nutzwert in etwa proportional zur Bewertungsgröße. Ist jedoch ein bestimmtes Maß erreicht, so nimmt der Nutzwert nur noch gering zu (vgl. Abbildung 4-2). Diese Darstellung bezieht sich auf Kriterien mit positiver Wirkungsrichtung und gilt für Kriterien mit negativer Wirkungsrichtung analog. Diese Funktion kann zu einer abschnittsweise linearen Funktion vereinfacht werden, deren Knickpunkte durch einen Grenzwert und einen Zielwert definiert werden. Der Zielwert stellt dabei (analog zum BNB-System) den wünschenswerten Zustand für das betrachtete Kriterium dar, der Grenzwert entspricht einer unzureichenden Zielerfüllung. Dem Grenzwert wird der minimale Nutzwert von 0 zugeordnet<sup>37</sup>, dem Zielwert ein Nutzwert von 1, der nicht mehr gesteigert werden kann. Ziel- und Grenzwert sind jeweils passend zur Aufgabenstellung zu wählen. Fehlen hierzu Erfahrungswerte so können Ziel- und Grenzwert hilfsweise in Anlehnung an die TOPSIS-Methode aus der Bewertungsmatrix abgeleitet werden. Hierzu sind zunächst die Ergebnisse aller Alternativen bezüglich eines Kriteriums zu bestimmen. Das Minimum und das Maximum der ermittelten Indikatorwerte stellen Grenz- und Zielwert dar. Jedoch kann diese relative Bewertung zu Verfälschungen führen, wenn die von den Alternativen erzielten Ergebnisse in einem – absolut gesehen – kleinen Korridor liegen. Außerdem kann sich die Reihenfolge der Alternativen bei Hinzunahme oder Wegfall von Alternativen ändern.

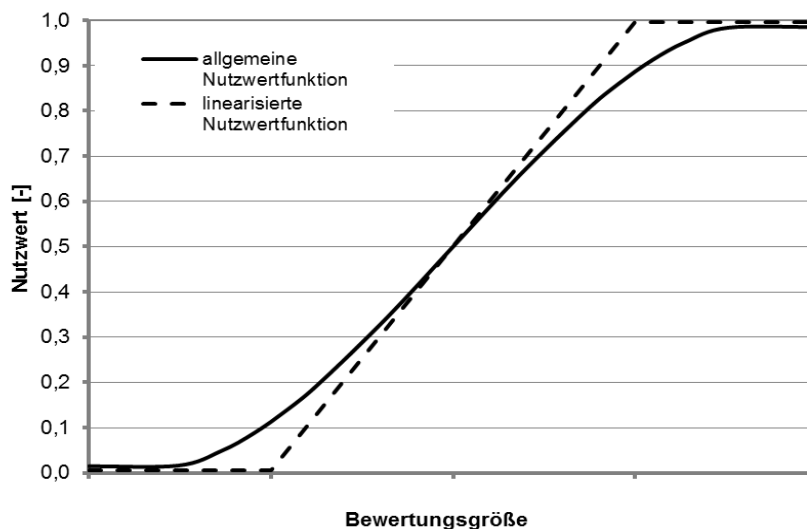


Abbildung 4-2: Nutzwertfunktionen für Kriterien mit positiver Wirkungsrichtung

<sup>37</sup> Im BNB-System wird abweichend hierzu aus Verfahrensgründen mit Erreichen des Grenzwerts mindestens ein Nutzen von 0,1 erzielt.

Für ordinale Kriterien muss der Nutzwert über ein Rating bestimmt werden. Bei dieser quasi-kardinalen Form der Bewertung legt der Bewertende Stufen der Zielerfüllung von „unzureichend“ bis „voll“ fest, die als Kategorien definiert und verbal beschrieben werden. Jede Kategorie entspricht einem bestimmten Nutzwert, wobei das Rating mindestens die Stufen 0 und 1 sowie einen Zwischenwert enthalten sollte. Im Rahmen der Bewertung wird jede Alternative einer Kategorie zugeordnet und damit der entsprechende Nutzwert bestimmt. Die Abstufung sollte daher weder zu grob noch zu fein sein, um eine zweifelsfreie Zuordnung zu ermöglichen. Gegebenenfalls können auch Zwischenwerte zwischen zwei Kategorien zugelassen werden. In Tabelle 4-4 ist zur Veranschaulichung ein Rating für das Kriterium „Einflussnahme der Nutzer auf das Raumklima“ dargestellt. In Anlehnung an *BMVBS* (2009c, S.3.1.6/1ff) wird zwischen drei Kategorien von „weitreichender Einfluss“ bis „kein Einfluss“ unterschieden.

*Tabelle 4-4: Beispielhaftes Rating für die Einflussnahme der Nutzer auf das Raumklima [eigene Darstellung in Anlehnung an BMVBS (2009c, S.3.1.6/1ff) ]*

Kategorie	entspricht	Beschreibung	Nutzwert
A	volle Zielerfüllung	Raumklima raumweise beeinflussbar	1
B	durchschnittliche Zielerfüllung	Raumklima zonenweise beeinflussbar	0,5
C	unzureichende Zielerfüllung	Kein Einfluss der Nutzer	0

### 4.4.4.3 Gewichtungsfaktoren

Die Wahl der Gewichtung stellt einen wichtigen Schritt der Multikriterienbewertung dar. Die Gewichtungsfaktoren können nicht objektiv bestimmt werden, sondern spiegeln die (impliziten) Präferenzen des Entscheiders wider. Die Gewichtungen können nach der AHP-Methode durch paarweisen Vergleich der Kriterien untereinander ermittelt werden. Für jedes Kriterienpaar ist zu bestimmen, welches Kriterium wichtiger ist und wie groß der Bedeutungsunterschied ist. Der Unterschied ist auf einer Skala von 1 (gleichbedeutend) bis 9 (maximaler Bedeutungsunterschied) zu bewerten. Aus den abgegebenen Bewertungen wird eine Vergleichsmatrix bestimmt. Aus ihr können die Gewichte für die Kriterien berechnet werden. Das Vorgehen wird in Anhang E anhand eines Beispiels erläutert. Dieses Vorgehen bietet gegenüber der intuitiven Verteilung der Gewichte einen entscheidenden Vorteil: Die logische Konsistenz der abgegebenen Bewertungen wird quantifiziert. So wird der Bewertende auf eventuelle Widersprüche in seiner Bewertung aufmerksam.

Gewichtungsfaktoren sind für alle (quasi-)kardinal bewerteten Kriterien zu bestimmen. Kriterien, die als Mindestanforderung betrachtet werden, erhalten kein Gewicht, da eine

Nichterfüllung direkt zum Ausschluss der Alternative führt. Es ist zu beachten, dass mit der Zahl der Kriterien die Zahl der paarweisen Vergleiche übermäßig zunimmt. Bei mehr als 5-6 Kriterien sollte der Kriterienkatalog daher hierarchisch gegliedert werden. Es werden dann zunächst die Gewichte der oberen Ebene bestimmt und danach die Gewichte der unteren Ebenen.

Alternativ können auch Gewichte aus bestehenden Systemen, z.B. dem BNB-System abgeleitet werden.

### 4.5 Verfahren zur Lebenszyklus-Szenarienbewertung

#### 4.5.1 Aufbau und Elemente des Verfahrens

Das Verfahren zur Lebenszyklus-Szenarienbewertung basiert auf den in Abbildung 4-3 dargestellten Elementen. Dies sind zunächst die Planungsvarianten auf der einen Seite und die Szenarien für den Lebensweg des Gebäudes auf der anderen Seite. Beide werden in der Entscheidungsmatrix zusammengeführt. Im Kern des Verfahrens steht die Analyse der Entscheidungsmatrix. Planungsvarianten, Szenarien und Analyseverfahren werden in den folgenden Abschnitten 4.5.2, 4.5.3 und 4.5.4 dargestellt.

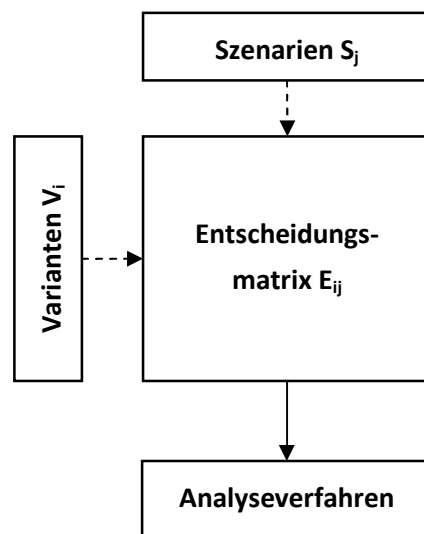


Abbildung 4-3: Elemente des Verfahrens zur Lebenszyklus-Szenarienbewertung

#### 4.5.2 Varianten

Die zu betrachtenden Baukonstruktionen werden jeweils zu Planungsvarianten für ein Gebäude ausformuliert. Diese Planungsvarianten sollen sich nur in technischen Gesichtspunkten in Bezug auf die Aufgabenstellung unterscheiden. Besteht die Aufgabenstellung z.B. in einer Bewertung der Reinigungsfreundlichkeit, so sollten die Oberflächen, deren



Verschmutzungsempfindlichkeit und der Reinigungsaufwand variiert werden. Eine gleichzeitige Variation anderer technischer Gesichtspunkte, z. B. Tragsystem, Energiekonzept o.ä. ist hingegen nicht zielführend. Sind Kombinationen von konstruktiven Lösungen möglich, so werden diese zu jeweils eigenen Planungsvarianten zusammengestellt. Die Zahl der Varianten ist im Hinblick auf die spätere Bewertungsmatrix zu begrenzen. Gegebenenfalls müssen zunächst gröbere Obervarianten gebildet werden, zu denen es jeweils detaillierte Untervarianten gibt. Die Varianten werden so formuliert, dass sie einander ausschließen (Exklusionsprinzip).

Die Planungsvarianten des Gebäudes stellen die alternativen Handlungen im Sinne der Entscheidungstheorie dar. Der Forderung nach einer *vollkommenen Alternativenstellung* [Bamberg, Coenenberg & Krapp (2008, S. 16), Mag (1990, S. 45–46)] wird mit folgenden realitätsnahen Einschränkungen entsprochen:

Die Planungsvarianten umfassen alle Konstruktionsalternativen, die der Entscheidungsträger prinzipiell in Betracht zieht. Diese Menge ist kleiner als die Menge aller denkbaren Alternativen, da der Entscheidungsträger die Auswahl bereits vorher anhand expliziter oder impliziter Grundanforderungen eingrenzt. Die Forderung nach dem vollen Ausschöpfen des Möglichkeitsraums ist damit im Rahmen der praktischen Anwendung erfüllt. Die Unterlassenalternative stellt in der Regel keine Variante dar, da davon ausgegangen werden kann, dass ein Bedarf für ein Gebäude besteht und eine der betrachteten Alternativen umgesetzt werden wird.

### 4.5.3 Szenarien

Die Szenarien stellen die berücksichtigten Umweltzustände im Sinne der Entscheidungstheorie dar. Sie bilden die ganze Bandbreite der denkbaren Zukünfte des Gebäudes ab. Für jedes Gebäude sind grundsätzlich beliebig viele Lebenswege denkbar, die jeweils durch einen bestimmten zeitlichen Verlauf charakteristischer Prozesse wie Instandhaltung, Betrieb und Rückbau gekennzeichnet sind. Hinzu kommen kostenbezogene Deskriptoren wie die Preisentwicklung und der Diskontsatz, die die Zahl der Umweltzustände noch vervielfachen. Für die praktische Durchführung ist die Zahl der betrachteten Szenarien jedoch in Abhängigkeit der Variantenzahl zu begrenzen, da der Beurteilungsaufwand mit jedem betrachteten Szenario ansteigt.

Aus Sicht der Entscheidungstheorie mag dies zunächst ein Problem darstellen, da dem Entscheidungsmodell einige Annahmen hinsichtlich der Vollständigkeit der Umweltzustände zugrunde liegen. Für die Umweltzustände wird – analog zu den Alternativen – Vollständigkeit gefordert, d.h. dass alle für den Entscheidungsträger relevanten Umweltzustände bekannt sind und diese sich gegenseitig ausschließen [Mag (1990, S. 49)]. Mit anderen Worten, es soll genau einer der betrachteten Umweltzustände eintreten [Laux (2007, S. 23)]. Andererseits können im vorliegenden Verfahren nur eine

begrenzte Anzahl an Szenarien berücksichtigt werden und damit keineswegs alle denkbaren Lebenswege des Bauwerks. Jedoch können einzelne konkrete Szenarien ausgewählt werden und man kann diese ausgewählten Szenarien „als eine Stichprobe aus einer größeren Grundgesamtheit auffassen, von der man hoffen kann, dass sie repräsentativ ist und bei der eine Entscheidungsregel zu einem etwa gleichen Ergebnis führt wie bei der hypothetischen Grundgesamtheit“ [Mag (1990, S. 49)]. In der vorgeschlagenen Methodik werden alle denkbaren Umweltzustände in eine überschaubare Anzahl von Klassen eingeteilt und ein repräsentatives Szenario für jede Klasse ausgewählt. Die Klassen erfüllen die Forderung, zusammen den Gesamttraum der Umweltzustände abzudecken und sich gegenseitig auszuschließen. Auf diese Weise kann der Beurteilungsaufwand sinnvoll eingeschränkt werden. Sind für den Fall der Entscheidung unter Unsicherheit Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Szenarien anzugeben, so ist hierunter die Wahrscheinlichkeit für die ganze Klasse zu verstehen. Die Wahrscheinlichkeiten aller Klassen addieren sich dann zu eins.

Eine stochastische Modellierung der Deskriptoren in Verbindung mit einer Risikoanalyse wurde für die vorliegende Methodik nicht in Erwägung gezogen. Grund hierfür ist, dass der Zusammenhang zwischen dem Ergebnis der Nachhaltigkeitsbeurteilung und den Deskriptoren nicht durch eine analytische Funktion ausgedrückt werden kann. Eine geschlossene Lösung kann daher nicht angegeben werden. Auch kann kein automatisierbarer Lösungsalgorithmus für das Problem angegeben werden, eine Monte-Carlo-Simulation oder ähnliche auf Computer-Simulationen beruhende Verfahren scheiden daher ebenfalls aus.

### 4.5.4 Analyse der Entscheidungsmatrix

Die Entscheidungsmatrix enthält die Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbewertung  $E_{ij}$  für alle Varianten  $V_i$  in jedem Szenario  $S_j$ . Bei  $n$  Varianten und  $m$  Szenarien müssen also  $n \times m$  Bewertungen durchgeführt werden. Die jeweiligen Ein-Zahl-Ergebnisse  $E_{ij}$  werden in einer  $n \times m$ -Matrix als Entscheidungsmatrix (vgl. Tabelle 4-5) angeordnet. In einer Spalte können die Varianten untereinander für ein gegebenes Szenario verglichen werden. In einer Zeile sind hingegen die Ergebnisse einer bestimmten Variante für alle betrachteten Szenarien enthalten.

Die entscheidende Aufgabe besteht in der Analyse der Entscheidungsmatrix. Dabei ist es nicht Ziel der Auswertung, nach einem starren Algorithmus eine Variante als Vorzugsvariante zu identifizieren. Vielmehr dient die Analyse der Entscheidungsmatrix dem Verständnis der Zusammenhänge zwischen den Varianten und Szenarien. Nur unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Präferenzen kann daraus abgeleitet werden, welche Varianten unter welchen Gegebenheiten favorisiert werden.

#### 4 Entwicklung einer Methodik zur Lebenszyklusanalyse unter Ungewissheit

Tabelle 4-5: Aufbau einer  $n \times m$ -Entscheidungsmatrix  $E_{ik}$

		Szenarien $S_k$				
		$S_1$	...	$S_k$	...	$S_l$
Varianten $V_i$	$V_1$	$E_{11}$	...	$E_{1,k}$	...	$E_{1l}$
	...	...	...	...	...	...
	$V_i$	$E_{i,1}$	...	$E_{i,k}$	...	$E_{i,l}$
	...	...	...	...	...	...
	$V_n$	$E_{n1}$	...	$E_{n,k}$	...	$E_{nl}$

Für die Auswertung werden zunächst ineffiziente Varianten von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen. Die ineffizienten Varianten sind dadurch gekennzeichnet, dass es mindestens eine Variante gibt, die in jedem Szenario gleich gut oder besser beurteilt wird.

Daraufhin wird die Entscheidungsmatrix auf Dominanz einer einzelnen Variante untersucht. Das Indifferenzkriterium, wonach in einem gegebenen Szenario  $S_k$  für zwei Varianten  $V_1$  und  $V_2$  gilt:

$$V_1 \sim V_2 \Leftrightarrow E_{1k} = E_{2k} \text{ für alle } k \quad \text{Gl. 4-2}$$

kann zugunsten eines weichen Indifferenzkriteriums aufgegeben werden, wonach zwei Alternativen auch dann als gleichwertig betrachtet werden, wenn sie sich im Ergebnis höchstens um die Differenz  $\varepsilon$  unterscheiden:

$$E_{1k} \in [E_{2k} - \varepsilon; E_{2k} + \varepsilon] \vee E_{2k} \in [E_{1k} - \varepsilon; E_{1k} + \varepsilon] \Rightarrow V_1 \sim V_2 \quad \text{Gl. 4-3}$$

Durch schrittweise Steigerung der Schranke  $\varepsilon$  werden weitere ineffiziente Varianten gestrichen, bis schließlich entweder eine einzige Variante übrig bleibt, oder mehrere Varianten, zwischen denen Indifferenz herrscht. Existiert bei kleinem  $\varepsilon$  eine einzige dominante Alternative, so kann diese als favorisierte Alternative betrachtet werden.

Andernfalls werden die Entscheidungsregeln bei Ungewissheit (Maximin-Regel, Maximax-Regel, Hurwicz-Regel, Savage-Niehans-Regel, Laplace-Regel) angewendet. Eine Sensitivitätsanalyse unter Variation der Präferenzen des Entscheiders (Optimismuskoeffizient) prüft die Stabilität der Rangfolge der Varianten.

Durch Abschätzen von Wahrscheinlichkeiten für die Umweltsituationen können schließlich noch die Bayes-Regel und das Hodges-Lehmann-Kriterium ausgewertet

werden. Hier sollte die Sensitivität bezüglich der geschätzten Wahrscheinlichkeiten untersucht werden.

Im letzten Schritt werden die Rangfolgen der Varianten nach den verschiedenen angewendeten Entscheidungsmaximen verglichen. Sind die Rangfolgen weitgehend stabil, so kann leicht eine Vorzugsvariante identifiziert werden. Ansonsten ist darzulegen unter welchen Umständen welche Variante zu bevorzugen ist. Ergebnis einer solchen Analyse könnte z.B. sein, dass ein risikofreudiger Entscheider zur Rangfolge  $A \succ B \succ C \sim D \sim E \succ F$  neigt, während ein risikoscheuer Entscheider zur Rangfolge  $E \succ B \succ C \sim D \succ A \succ F$  gelangt. Mit derartigen Informationen kann dann die Vorteilhaftigkeit der Planungsvarianten interpretiert werden.

Bei mehr als drei Varianten bietet sich die Darstellung der Rangfolgen in einem gerichteten Graphen an. Jede Variante wird durch einen Knoten repräsentiert. Zunächst werden für jede Rangfolge von der ranghöchsten zur rangniedrigsten Variante Pfeile eingetragen. Zwischen indifferenten Varianten wird keine Verbindung eingezeichnet. Schließlich können die Pfeile zwischen zwei Knoten auf einen Pfeil je Richtung reduziert werden, dessen Stärke relativ zur ursprünglichen Anzahl der Pfeile ist (vgl. Beispiel in Abbildung 4-4). Diese grafische Veranschaulichung kann die Interpretation unterstützen.

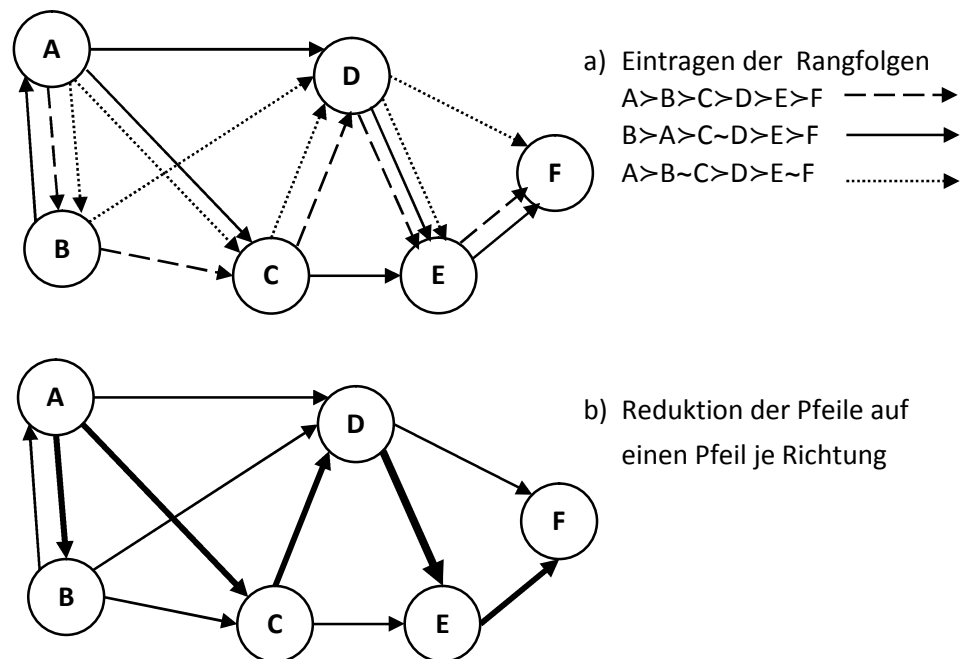


Abbildung 4-4: Beispiel zur Darstellung dreier Rangfolgen in einem gerichteten Graphen

### 4.6 Modellbildung

#### 4.6.1 Bedeutung

Eine einheitliche Beschreibung des Gebäudes und seines Lebenszyklus ist die Voraussetzung für eine konsistente Kriterienbewertung. Insbesondere müssen die Ökobilanzierung und die Lebenszykluskostenrechnung dieselben Systemgrenzen umfassen. Ein schlüssiges Modell ist außerdem Grundlage für das Verständnis der Material- und Medienströme und dient der einheitlichen Gliederung der Berechnungsergebnisse. Mit Hilfe des Modells soll die Wirklichkeit in abstrahierter Form abgebildet werden – vereinfacht aber im notwendigen Detaillierungsgrad.

Grundlage für die Auswertung von Ökobilanz und Lebenszykluskosten, aber auch für weitere Kriterien mit Lebenszyklusbezug wie z.B. Wasserbedarf, sind die sogenannten Material- und Medienströme. Sie bilden als sogenannte Stoffstrombilanz die Eingangsdaten der ökologischen und ökonomischen Analyse. Hierunter ist eine quantifizierte Zeitreihe der Inputs und Outputs an Material, Energieträgern und Verbrauchsmedien bezogen auf die Systemgrenze des Bauwerks zu verstehen.

Für die Erstellung einer Ökobilanz und der Kostenrechnung sind in ihr für alle Zeitpunkte des Lebenszyklus Art und Menge des eingesetzten Materials und der eingesetzten Medien sowie des zu entsorgenden Materials bzw. Mediums festgehalten. Die Informationen werden anschließend für jedes Material bzw. Medium mit der Ökobilanz und den Kosten verknüpft. Da der Zeitpunkt der kostenverursachenden Prozesse für die Kapitalwertberechnung zu berücksichtigen ist, müssen diese Informationen vollständig über alle Bauteile und Verbrauchsgüter für den gesamten Lebenszyklus vorliegen.

Eine Stoffstrombilanz könnte z.B. wie folgt aussehen: Im Erstellungsjahr werden 1600 m<sup>3</sup> Beton, 120 Stück Fenster, 1150 m Heizungsrohre, eine Wärmeerzeugungsanlage usw. eingebracht (Input zum Jahr 0). Ab dem ersten Nutzungsjahr werden jährlich 19.100 m<sup>3</sup> Erdgas für die Wärmeversorgung, 113.000 kWh Strom für die Beleuchtung, 750 m<sup>3</sup> Trinkwasser usw. benötigt (Inputs zum Jahr 1, 2, ...). Im 20. Nutzungsjahr werden die Fenster ausgebaut und entsorgt und durch neue Fenster ersetzt (Output und Input zum Jahr 20). Im Laufe des Lebenszyklus werden weitere Gebäudekomponenten ersetzt oder erneuert. Am Ende des Lebenszyklus werden 1600 m<sup>3</sup> Betonabbruch, 120 Stück Fenster usw. ausgebaut und entsorgt (Output zum Jahr 80).

#### 4.6.2 Gebäudemodell

Zur vollständigen Erfassung der Stoffstrombilanz ist es zunächst nötig, alle relevanten Bauteile und Verbrauchsgüter im Modell des Gebäudes zu erfassen (vgl. Abbildung 4-5). Das vollständige Gebäudemodell besteht aus einer hierarchisch geordneten Auflistung

aller Materialien, die mengenmäßig quantifiziert sind, sowie aller Medien, deren jährlicher Bedarf quantifiziert ist.

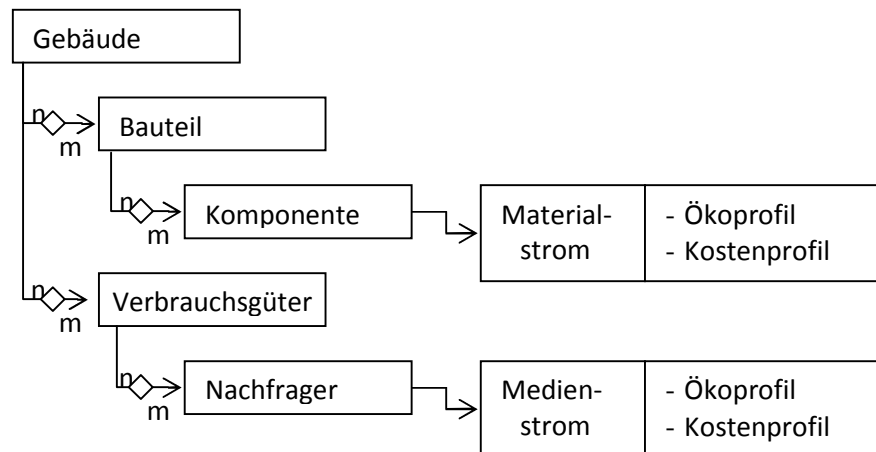


Abbildung 4-5: Gebäudemodell

Für die Gebäudebauteile dient DIN 276-1 als Grundlage. Im Allgemeinen umfasst der Untersuchungsrahmen die Kostengruppen 300 „Baukonstruktionen“ und 400 „Technische Anlagen“, die zugleich die erste Gliederungsebene darstellen. Bei Bedarf kann der Untersuchungsrahmen auf die Kostengruppen 500 „Außenanlagen“ und 600 „Ausstattung und Kunstwerke“ erweitert werden. Auf der zweiten Ebene werden Konstruktionstypen bzw. Anlagentypen unterschieden (z.B. Außenwände, Dächer, Wärmeversorgungsanlagen etc.). Auf der dritten Ebene werden Funktionsgruppen zusammengefasst (z.B. Dachkonstruktion, Dachfenster, Dachbelag, Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung etc.). Ausgehend von dieser Gliederung wird eine vierte Ebene eingeführt, mit der die einzelnen Komponenten identifiziert werden können. Bei Bauteilen sind unter den Komponenten die einzelnen Materialschichten (z.B. Dachziegel, Windsperre, Dämmung, etc.) bzw. Teile (z.B. Fensterrahmen, Verglasung, Beschlag, etc.) zu verstehen. Für ihre Gliederung bestehen keine Vorgaben, so dass sie angepasst an die Projekterfordernisse gewählt wird. Bei technischen Anlagen kann für eine nähere Bestimmung der Anlagenkomponenten beispielsweise die vierte Ebene nach DIN 277-3 Tabelle 2 Verwendung finden (z.B. Wärmepumpe, etc.). Die notwendige Gliederungstiefe ergibt sich aus den zugrundegelegten Datensätzen für LCA und LCC. Sind beispielsweise Baustoffprofile für komplette Fenster verfügbar, so kann auf eine weitere Gliederung in Einzelkomponenten des Fensters verzichtet werden.

Für die Gliederung der Verbrauchsgüter dient Kostengruppe 310 (Betriebskosten-Versorgung) aus DIN 18960 Nutzungskosten im Hochbau als Grundlage. Die Verbrauchsgüter gliedern sich demnach in Wasser, Öl, Gas, feste Brennstoffe, Fernwärme, Strom, technische Medien wie z.B. Druckluft und sonstige Verbrauchsgüter. Als

zusätzliche Gliederungsebene wird der Nachfrager des Verbrauchsguts eingeführt, um die Ursache des Verbrauchs unterscheiden zu können. So kann Wasser z.B. als Trinkwasser oder für die Reinigung benötigt werden. Der Strombedarf kann z.B. aus Beleuchtung, Kühlung, Beheizung etc. resultieren. In der Regel genügt eine Gliederung der Verbrauchsgüter in diese zwei Ebenen.

### 4.6.3 Lebenszyklusmodell

#### 4.6.3.1 Definition des Lebenszyklus

Des Weiteren wird für die Zeitreihe des Material- und Medienstroms ein Lebenszyklusmodell des Gebäudes benötigt. Ein konsistentes Lebenszyklusmodell bildet die Basis für die zutreffende Beschreibung des Gebäudes in seiner zeitlichen Entwicklung. Durch die Abgrenzung einzelner Lebensphasen und die Festlegung von zeitlichen Systemgrenzen schafft es außerdem eine Grundlage für die Analyse der Bewertungsergebnisse.

Der Lebenszyklus eines Bauwerks wird im Allgemeinen in drei Lebenszyklusphasen unterteilt [DAfStb (i.V., S. 20)]. Er beginnt mit der Herstellung des Bauwerks. Den zeitlich längsten Abschnitt bildet die Nutzungsphase. Den letzten Lebenszyklusabschnitt stellt die Beseitigung des Bauwerks dar (vgl. Abbildung 4-7). Häufig sind Bauwerke im Verlaufe ihres Lebenswegs baulichen Änderungen unterworfen. Im Lebenszyklusmodell kann dies so dargestellt werden, dass auf den Umbau eine neue Nutzungsphase folgt. Alle Änderungen und Nutzungen bis hin zur endgültigen Beseitigung gehören nach der in dieser Arbeit verwendeten Definition zum Lebenszyklus des Bauwerks. Daneben gibt es in der Literatur weitere Definitionen. Nach *Riegel* (2004, S. 10) kann eine Systemgrenze für den Lebenszyklus einer Immobilie bei tiefgreifenden Änderungen wie z.B. einer Revitalisierung gezogen werden. Die nachfolgende Nutzung wird einem neuen Lebenszyklus zugerechnet. Für die Nachhaltigkeitsanalyse ergäbe sich hieraus ein Allokationsproblem: Für Bauteile und Komponenten, die sowohl im ersten Lebenszyklus als auch im zweiten genutzt werden, ist zu entscheiden, wie die Aufwendungen für deren Herstellung und Beseitigung aufzuteilen sind. Nach *Riegel* stellen außerdem kleinere Änderungen, wie Modernisierungen, kein Ende des Lebenszyklus dar. Da jedoch die Abgrenzung zwischen Modernisierung und Revitalisierung fließend ist und das Untersuchungsinteresse dem physikalischen Bauwerk, nicht dem Projekt „Immobilie“ gilt, wird diese Definition für die vorliegende Arbeit nicht übernommen. Das Bauwerk ist nach der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik also stets bis zu seiner letztlichen Beseitigung zu betrachten. Für eventuelle Änderungen können passende Szenarien gebildet werden.

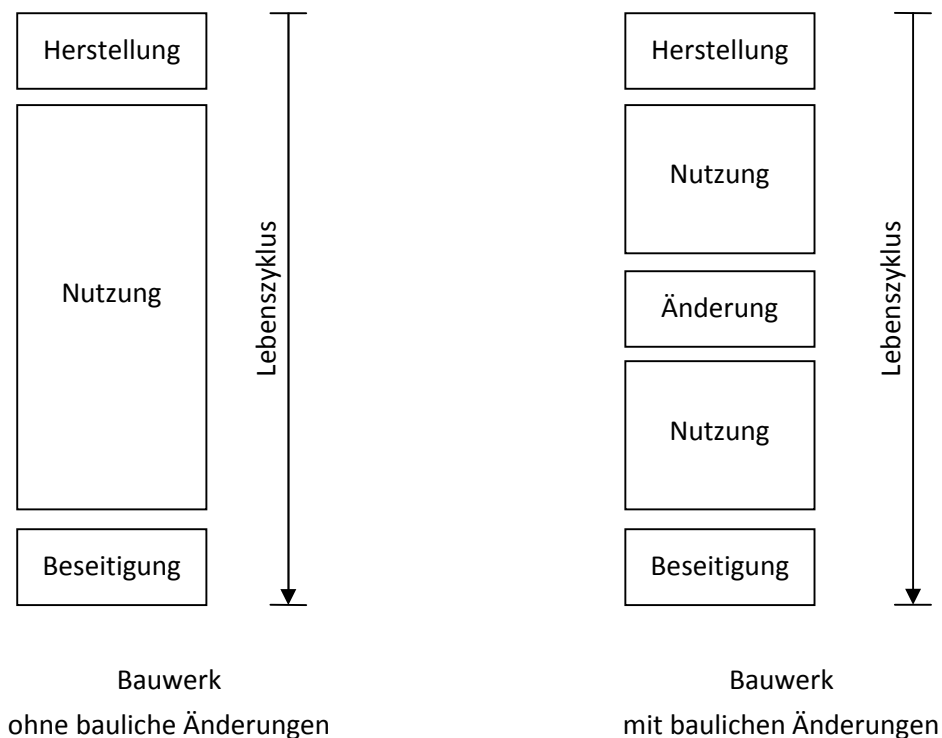


Abbildung 4-6: Definitionen des Lebenszyklus eines Bauwerks

Die einzelnen Lebenszyklusphasen untergliedern sich weiter in Sub-Lebenszyklusphasen und Prozesse (vgl. Abbildung 4-7). Herstell- und Beseitigungsphase wie auch Änderungsphase gliedern sich jeweils in einen Planungs- und einen Ausführungsteil, die im Modell als logisch aufeinanderfolgende Sub-Lebenszyklusphasen dargestellt sind. In der Realität können sie jedoch zumindest in Teilen zeitlich parallel ablaufen. Die Nutzungsphase gliedert sich in den fortlaufenden Betrieb und die unregelmäßig auftretende Instandsetzung. Insbesondere in der Herstellphase wird die Planung weiter in Konzeption, Vorplanung und Detailplanung untergliedert. Da Planungsprozesse jedoch sowohl in der ökologischen als auch in der ökonomischen Bilanzierung in der Regel vernachlässigt werden, soll im Folgenden nicht näher darauf eingegangen werden. Näher betrachtet werden in den nachfolgenden Abschnitten hingegen die Ausführungsprozesse von Herstellung, Änderung und Beseitigung, sowie der Betrieb und die Instandsetzung.



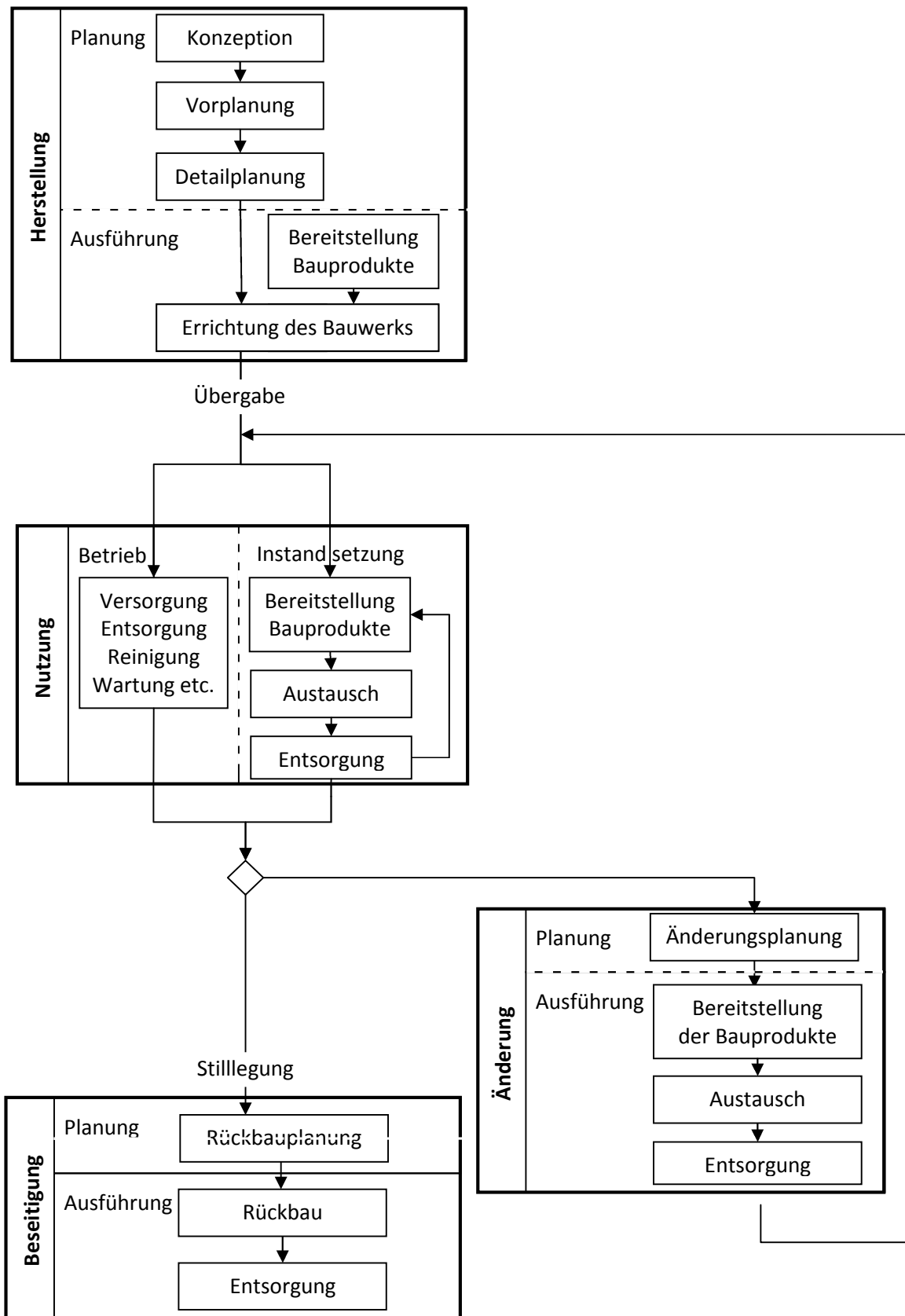


Abbildung 4-7: Lebenszyklusphasen eines Gebäudes

#### **4.6.3.2 Herstellung**

Die Lebenszyklusphase der Herstellung umfasst die Zeitspanne vom Beginn des Lebenszyklus bis zur Übergabe an den Nutzer. Zum Ausführungsprozess zählt auch die Bereitstellung der Bauprodukte, das heißt deren Produktion einschließlich Transport zur Baustelle, wo aus ihnen während des Errichtungsprozesses schließlich das Bauwerk entsteht. Die Herstellphase ist insbesondere durch den Input von Material charakterisiert.

Obwohl die Ausführungsprozesse in der Realität eine längere Zeitspanne umfassen, werden sie in Bezug auf die Stoffstrombilanz gedanklich auf den Zeitpunkt der Baufertigstellung konzentriert. Dieser „Herstellzeitpunkt“ gilt dann als der Startpunkt des Lebenszyklus. Er wird mit dem Beginn des Betrachtungsrahmens zusammengelegt und bildet als „Jahr 0“ gleichzeitig die Referenz für den Barwert bei der Lebenszykluskostenbetrachtung.

#### **4.6.3.3 Betrieb**

Der Betrieb des Gebäudes umfasst den gesamten Zeitraum zwischen Übergabe und Stilllegung des Bauwerks. Zu den Betriebsprozessen gehören nach DIN 18960 die Ver- und Entsorgung, Reinigung und Pflege, Bedienung, Wartung und Inspektion. Sie sind gekennzeichnet durch ihren dauernden oder regelmäßigen Anfall und durch den Input der Verbrauchsgüter Wasser, Strom, Gas, Öl, Fernwärme etc. Für die Stoffstrombilanz wird der jährliche Bedarf dieser Güter ermittelt und sein zeitliches Auftreten auf einen Einzelzeitpunkt (in der Regel das Jahresende) summiert angenommen.

Bei unveränderten Rahmenbedingungen bleibt der jährliche Bedarf an Verbrauchsgütern ebenso wie ihr Beitrag zur Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus konstant. Für die Lebenszykluskostenrechnung stellen die Verbrauchsgüter dann einen exponentiell steigenden Kostenbestandteil (infolge der in der Regel konstant angenommenen Preissteigerung) dar.

Bei Anwendung der Szenarienbewertung ergeben sich typischerweise während des Lebenszyklus Veränderungen der Rahmenbedingungen. Denkbar sind z.B. nachträgliche bauliche Maßnahmen zur Wärmedämmung, ein Austausch der Anlagentechnik, Änderungen der Nutzungsart, etc. Derartige Änderungen der Rahmenbedingungen schlagen sich in der Stoffstrombilanz durch einen geänderten Bedarf an Verbrauchsgütern nieder.

#### **4.6.3.4 Instandsetzung**

Die Instandsetzung dient der Wiederherstellung des Sollzustandes eines Bauteils oder einer Anlage. Instandsetzungsprozesse fallen während der Nutzungsdauer jedesmal dann an, wenn Materialien und Bauteile ausgetauscht werden. Sie sind durch den Output von Abfallmaterial und den Input von Neumaterial gekennzeichnet. In der Realität können umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen einen längeren Zeitraum beanspruchen. Für

die Stoffstrombilanz werden jedoch Input und Output auf denselben Zeitpunkt, nämlich das Jahresende, bezogen. In dieser Arbeit werden im Folgenden die planmäßige und die unplanmäßige Instandsetzung unterschieden.<sup>38</sup>

Die **planmäßige Instandsetzung** fällt an, wenn eine Komponente des Bauteils oder einer Anlage ihre Lebensdauer erreicht hat und ersetzt werden muss. Das Ende der Lebensdauer kann dabei technisch oder wirtschaftlich bedingt sein. Die Einflüsse auf die Lebensdauer sind vielfältig und reichen von der Verarbeitungsqualität über Umwelteinflüsse und Instandhaltungsstrategien bis zur Fortschreibung des Stands der Technik. Über durchschnittliche Lebensdauern von Baustoffen liegen Erfahrungswerte aus der Literatur<sup>39</sup> vor. Oft ist es im Rahmen der Analyse ausreichend, den Zeitpunkt einer Instandsetzungsmaßnahme anhand der durchschnittlichen Lebensdauer zu ermitteln. Dabei ist auf die jeweilige Einbausituation zu achten, wenn z.B. der Austausch einer Wärmedämmung den Austausch der darüberliegenden noch intakten Putzschicht erfordert. Sollen im Rahmen der Szenarienbewertung unterschiedliche Einflüsse auf die Lebensdauer berücksichtigt werden, so sind genauere Ansätze zu wählen. Beispielweise kann mit Hilfe probabilistischer Schädigungsmodelle die Lebensdauer in Abhängigkeit der Umwelteinflüsse prognostiziert werden.

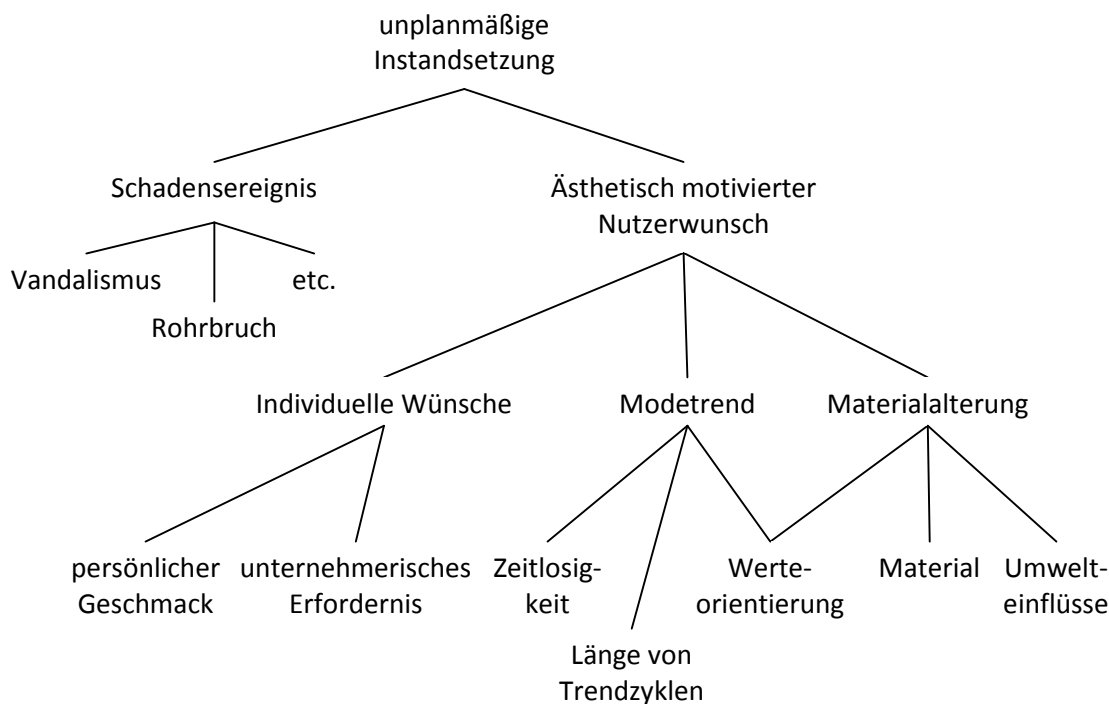


Abbildung 4-8: Ursachen der unplanmäßigen Instandsetzung

<sup>38</sup> Von der Instandsetzung ist die Instandhaltung begrifflich zu unterscheiden. Die Instandhaltung umfasst nach DIN 31051 die Maßnahmen Wartung, Inspektion und Instandsetzung.

<sup>39</sup> Für Zusammenstellungen vgl. z.B. BBR (2001, S. 6.11-6.18), Bogenstätter (2007) sowie die aktuelle Überarbeitung der Nutzungsdauerdatenbank des Informationsportals Nachhaltiges Bauen BMVBS (2009a).

Von der planmäßigen Instandsetzung von Bauteilen wird in dieser Arbeit die **unplanmäßige Instandsetzung** von Bauteilen unterschieden. Diese Unterscheidung ist notwendig, da die in der Literatur genannten durchschnittlichen Lebensdauern häufig zu optimistisch scheinen. Sie beträgt beispielsweise für Bodenfliesen 50 Jahre [nach BBR (2001, S. 6.11-6.18)], was der Alltagserfahrung zu widersprechen scheint. Demnach müssten Gebäude aus den 1960er Jahren noch mehrheitlich mit den Original-Bodenbelägen ausgestattet sein. Ursache für den scheinbaren Widerspruch ist, dass der Austausch von Bauteilen in der Realität häufig vor dem Erreichen der Lebensdauer erfolgt. Gründe sind zum einen unvorhergesehene Schadenereignisse, wie Wasserrohrbrüche oder Vandalismus und zum anderen ästhetisch motivierte Nutzerwünsche (vgl. Abbildung 4-8).

Schadensereignisse können im Rahmen der Szenarienbewertung bei der Bildung der Szenarien berücksichtigt werden. Für das Ereignis wird ein zufälliger Zeitpunkt im Lebenszyklus des Gebäudes bestimmt. Anschließend werden das Schadensausmaß und die notwendigen Instandsetzungsmaßnahmen abgeleitet.

Der zweite Effekt, nämlich, dass Komponenten aus rein ästhetischen Gesichtspunkten ausgetauscht werden, betrifft in erster Linie die Materialien des Ausbaus. Fassade, Bodenbeläge, Wandbekleidungen und Türen bis hin zur Sanitärausstattung prägen das Erscheinungsbild des Gebäudes. Ihr Austausch ist weniger durch ihre Lebensdauer bestimmt als von der Frage, ob sie den ästhetischen Vorstellungen des jeweiligen Nutzers entsprechen. Dies kann im Rahmen der Szenarienbewertung abgebildet werden. Einen Einfluss auf die Nutzungsdauer haben individuelle Wünsche, Modetrends und die Materialalterung. Das zugrunde liegende Wirkungsgeflecht soll im Folgenden näher analysiert werden.

Zunächst kann festgestellt werden, dass die ästhetischen Vorstellungen individuell verschieden und daher vom jeweiligen Nutzer abhängig sind. Besonders für die Wohnnutzung wechselt der persönliche Geschmack mit jedem Mieter. Auch im Bürobereich wechseln die Anforderungen an die Gestaltqualität nach *Kalusche* (2006, S. 7) „erfahrungsgemäß schnell. Dies betrifft vor allem den Innenausbau von Dienstleistungs- und Freizeiteinrichtungen. Ein neues Corporate Design [...] kann die vollständige Veränderung der Innenausstattung zur Folge haben, bevor die betroffenen Bauteile das Ende ihrer technischen Lebensdauer erreicht haben.“ Der Zeitpunkt von Instandsetzungsmaßnahmen kann insofern typischerweise mit dem Zeitpunkt von Mieter- oder Nutzerwechseln zusammenfallen.

Der Ausbau ist ferner der Mode unterworfen, was in der Szenarienentwicklung ebenfalls betrachtet werden kann. Häufig kann über die langfristige Entwicklung von Trendzyklen jedoch nur spekuliert werden kann. Dieser Mangel relativiert sich jedoch oft, da zum einen die Abhängigkeit von Modetrends durch Wahl möglichst zeitloser Oberflächen

verringert werden kann. Zum anderen wird in der Realität nicht auf jeden Modetrend direkt mit einer Instandsetzung reagiert.

Des Weiteren hat die Alterung der Materialien einen Einfluss auf deren Ästhetik. Je nach Materialeigenschaft und Umwelteinflüssen verändert sich ihr Erscheinungsbild im Laufe der Zeit. Ungewöhnlich starke Umwelteinflüsse können den Zeitpunkt der Instandsetzung insofern nach vorne verschieben. Doch nicht allein der Grad der tatsächlichen Veränderung sondern auch die Werteorientierung des Betrachters bestimmen, ob die Alterung als ästhetischer Mangel oder Bereicherung empfunden wird. Beides kann im Rahmen von Szenarien treffend abgebildet werden.

### 4.6.3.5 Änderung

Änderungen stellen stets einen Bruch im Lebenszyklusmodell dar. Sie werden durch äußere Faktoren, nämlich eine Veränderung des Bedarfs induziert und können insofern in Form von Szenarien abgebildet werden. Berücksichtigt werden können sowohl Veränderungen in der Nachfrage nach einer bestimmten Funktionalität und Gestaltqualität als auch Änderungen, die aufgrund neuer gesetzlicher Regelungen notwendig werden.

Auf diese äußeren Faktoren kann mit dem Umbau oder einer Umnutzung reagiert werden – oder gar nicht, indem beschlossen wird weiter abzuwarten (vgl. Abbildung 4-9).

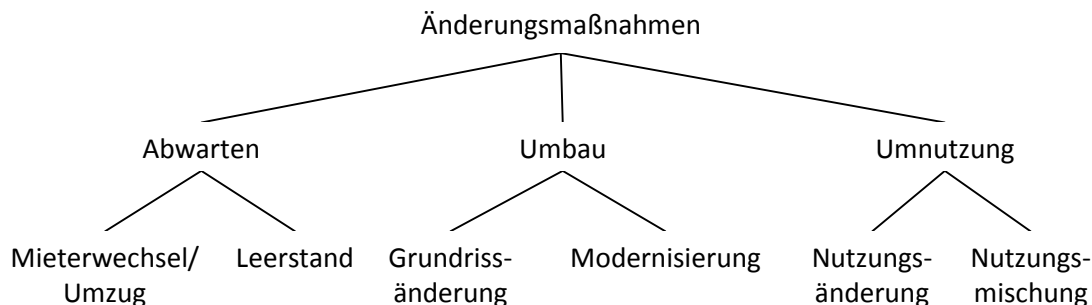


Abbildung 4-9: Gebäudebezogene Maßnahmen bei Änderungsbedarf

Das **Abwarten** stellt einen Sonderfall dar, der sich in der Stoffstrombilanz nicht durch zusätzliche Inputs oder Outputs bemerkbar macht. Die Berücksichtigung dieser Option kann jedoch für die Szenarienentwicklung notwendig sein. Wird die Diskrepanz zwischen dem Ist-Zustand des Gebäudes und den geänderten Anforderungen zu groß, so muss die Nutzung aufgegeben werden. Aus der Objektperspektive führt dieses Nichtstun langfristig zu erhöhtem Mieterwechsel oder Leerständen. Das Nichtstun kann jedoch auch die bewusste Entscheidung sein, eine Zeitlang abzuwarten, wenn die Situation unklar ist und alle Handlungsmöglichkeiten offen gehalten werden sollen.

Der **Umbau** grenzt sich von der Umnutzung dadurch ab, dass keine Änderung der Nutzungsart erfolgt. Doch auch bei gleichbleibender Nutzungsart können sich die

Anforderungen im Laufe der Zeit ändern, beispielsweise im Bürobau aufgrund einer geänderten Büroorganisation. Der Umbau ist in der Stoffstrombilanz durch den Output von Abfallmaterial und den Input von Neumaterial gekennzeichnet. Es können weiterhin zwei Fälle des Umbaus unterschieden werden. Eine Grundrissänderung erfordert das Entfernen und den Neueinbau von Innenwänden. Bei einer Modernisierung hingegen bleiben die Bauteile erhalten, jedoch werden z.B. Oberflächen, Fassade oder Haustechnik auf den neuesten Stand gebracht. Die Modernisierung ist damit der Instandsetzung aus ästhetischen Gründen ähnlich, grenzt sich aber durch eine Verbesserung des Standards ab.

Unter **Umnutzung** wird eine Änderung der Nutzungsart (Büros, Wohnen, Hotel, Einzelhandel, Arztpraxen, etc...) verstanden. Betrifft die Umnutzung das Gesamtgebäude so handelt es sich um eine Nutzungsänderung. Werden jedoch nur Teile des Gebäudes, z.B. einzelne Stockwerke, umgenutzt, so kommt es zu einer Nutzungsmischung. Sie erfordert in der Regel Umbaumaßnahmen, um das Gebäude an die jeweiligen Anforderungen anzupassen. In der Stoffstrombilanz ist die Umnutzung daher ebenfalls durch gleichzeitige Inputs und Outputs gekennzeichnet. Außerdem ändert sich nach der Umnutzung eventuell der Bedarf an Verbrauchsgütern, so dass in der Modellierung eine Betriebsphase vor der Umnutzung und eine Betriebsphase nach der Umnutzung unterschieden werden müssen.

#### **4.6.3.6 Beseitigung**

Am Ende der Lebensdauer eines Gebäudes erfolgt dessen Beseitigung durch seinen Rückbau und die Entsorgung bzw. Rückgewinnung der Baurestmassen. Diese Lebenszyklusphase ist daher durch den Output von Abfallmaterial gekennzeichnet. In der Stoffstrombilanz werden die Beseitigungsprozesse, ähnlich den Herstellprozessen, auf einen einzigen Zeitpunkt komprimiert. Der Zeitpunkt der Beseitigung fällt in der Regel mit dem Erreichen der Lebensdauer der Tragkonstruktion zusammen. Jedoch kann ein Gebäude auch vorzeitig rückgebaut werden, wenn kein Bedarf mehr für das Gebäude in seinem derzeitigen Zustand besteht und die oben genannten Änderungsmaßnahmen nicht infrage kommen.

#### **4.6.4 Funktionelle Einheit, Bezugsgrößen und Betrachtungsrahmen**

Für aussagekräftige Nachhaltigkeitsbeurteilungen müssen die gegenübergestellten Alternativen vergleichbar sein, d.h. einander in der Funktion gleichwertig. Aus der Ökobilanzierung stammt hierzu der Begriff der „funktionellen Einheit“. Sie beschreibt nach DIN EN ISO 14040, S. 10 den „quantifizierten Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit“.

Beispielsweise kann beim Vergleich von Außenwänden, die der Ableitung von Vertikallasten und dem Raumabschluss gegenüber Witterung und Lärm dienen, die

funktionelle Einheit z.B. als 1 m<sup>2</sup> Wand mit einer Tragfähigkeit von 200 kN/m, einem U-Wert von 0,12 W/m<sup>2</sup>K und einem Schalldämmmaß von 53 dB definiert werden.

Die Funktionen eines derart komplexen Gegenstands, wie ihn ein Gebäude darstellt, sind weitaus vielfältiger und zwei Planungsvarianten können hinsichtlich ihres Nutzens nicht identisch sein. Geht man davon aus, dass ein Gebäude für einen bestimmten Bedarf errichtet wird, für den es nutzbar sein soll, so zählen zu den Funktionen u.a.

- Raumgrößen, -formen und -anordnung
- Erschließung und Wegebeziehungen
- Vorhandensein benötigter Einrichtungen (z.B. Kantine)
- Ausstattungsumfang und -qualität
- thermische Konditionen in den Räumen (Behaglichkeit)
- akustische Konditionen in den Räumen
- visuelle Konditionen in den Räumen.

Es zeigt sich eine Überschneidung mit den Nachhaltigkeitskriterien des Kriterienkatalogs, insbesondere mit dem Kriterium der Funktionalen Eignung. Für diese Kriterien wird im Verfahren bereits ein Mindestanforderungsniveau definiert, das von allen Varianten zu erfüllen ist, oder die Kriterien werden explizit bewertet.

Für nicht explizit erfasste Funktionen kann in der Regel unterstellt werden, dass sich die Baukonstruktionsvarianten in dieser Hinsicht nicht Wesentlich unterscheiden, so dass von einem ähnlichen Nutzen ausgegangen werden kann. Dies ist z.B. der Fall, wenn gleiche Grundrisse vorliegen, so dass Raumgrößen, Wegebeziehungen, etc. identisch sind.

Unter diesen Voraussetzungen kann der Nutzen des Gebäudes über die zur Verfügung gestellte nutzbare Fläche über die Zeit quantifiziert werden. Dem liegt der Gedanke zugrunde, dass der gesellschaftliche Nutzungsbedarf in Summe zu befriedigen ist. Es ist demnach gleichwertig, ob ein Gebäude mit 100-jähriger Nutzungszeit oder zwei aufeinanderfolgende Gebäude mit je 50-jähriger Nutzungszeit zur Verfügung stehen. Ebenso wie zwei Gebäude mit je 500 m<sup>2</sup> Nutzfläche denselben Bedarf decken wie ein Gebäude mit 1000 m<sup>2</sup> Nutzfläche.<sup>40</sup>

Mit diesen Überlegungen kann als Vergleichseinheit das Produkt aus Nutzfläche und Nutzungszeit festgelegt werden. Die *Bezugsgröße* lautet m<sup>2</sup>·a. Die Wahl von „m<sup>2</sup>·a“ als

---

<sup>40</sup> Auch eine zeitliche Diskontierung des Nutzens wäre denkbar. Aus den ständig steigenden Pro-Kopf-Nutzflächen der Vergangenheit könnte man darauf schließen, dass 1m<sup>2</sup> Nutzfläche in Zukunft einen geringeren Nutzen besitze als 1 m<sup>2</sup> heutiger Nutzfläche. Aufgrund der in Fußnote 11 (S. 20) genannten Implikationen wird darauf in der vorliegenden Arbeit verzichtet.

Bezugseinheit bietet im Rahmen der Szenariobewertung einige Vorteile. Zunächst können durch den Bezug auf die Nutzfläche Gebäude unterschiedlicher Größe miteinander verglichen werden, ohne dass die Verwendung eines Kriteriums wie „Flächeneffizienz“ notwendig wird. Durch den Bezug auf die Nutzungszeit können außerdem Varianten mit unterschiedlichen Gesamtnutzungsdauern einander gegenübergestellt werden. Gebäude können mit ihrer tatsächlich erreichbaren Lebensdauer angesetzt werden, ohne dass eine bestimmte Betrachtungsdauer vorgegeben werden muss. Die Indikatoren der Nachhaltigkeitsbewertung werden als flächenbezogener jährlicher Durchschnitt angegeben. Für die meisten Kriterien, z.B. Ökobilanzkriterien, kann einfach das Gesamtergebnis durch die Nutzungsdauer geteilt werden. Bei den Lebenszykluskosten muss hingegen die Annuität als Indikator gewählt werden. Die Annuität ist das Analogon zum jährlichen Durchschnittswert unter Berücksichtigung des Diskontierungseffekts. Hierzu wird der Barwert der Lebenszykluskosten nicht durch die Nutzungsdauer geteilt, sondern durch den Rentenbarwertfaktor, der sich für den entsprechenden Zeitraum und den verwendeten Diskontsatz ergibt (vgl. auch Abschnitt 2.4.4.3).

In den *Betrachtungsrahmen* der Untersuchung sind alle relevanten Gesichtspunkte einzubeziehen. Dies betrifft zum einen die Auswahl der relevanten Kriterien und eine entsprechende Straffung des Kriterienkatalogs. Zum anderen müssen Gebäudemodell und betrachteter Lebenszyklus weit genug gefasst sein. Im Gebäudemodell sind mindestens diejenigen Bauteile und Verbrauchsgüter zu erfassen, in denen sich die Varianten unterscheiden. Obwohl eine vollständige Erfassung aller Material- und Medienströme grundsätzlich wünschenswert ist, kann es sinnvoll sein, Teile aus der Untersuchung auszuklammern, um den Bearbeitungsaufwand zu optimieren. Jedoch sollte die Auswahl nachvollziehbar begründet sein.

Der zeitliche Betrachtungsrahmen beginnt mit der Herstellung im Jahr 0 und endet mit der Beseitigung des Bauwerks. Er umfasst in der Regel einen Lebenszyklus. Es ist jedoch auch denkbar, dass in einem Szenario der Abriss eines Gebäudes mit einem anschließenden Neubau am selben Standort vorgesehen ist. Der Betrachtungsrahmen wird dann auf die Lebenszyklen zweier oder mehrerer hintereinander errichteter Gebäude ausgedehnt.

Der zeitliche Betrachtungsrahmen darf für einzelne Varianten und Szenarien unterschiedlich lang sein. Der Startzeitpunkt ist stets derselbe, das Ende fällt jedoch mit dem Ende des Lebenszyklus (des letzten Gebäudes) zusammen. Aufgrund der jährlichen Bezugsgrößen für LCA und LCC stellt dies keine Einschränkung dar.

Ein Sonderfall liegt bei einem Vergleich von Baumaßnahmen im Bestand vor, insbesondere, wenn ein Variante die Weiternutzung eines Bestandsbauwerks vorsieht und die alternative Variante einen Abriss mit Neubau. Es stellt sich die Frage, ob hier der Betrachtungsrahmen heute oder in der Vergangenheit mit der Herstellung des



Bestandsbaus beginnt. Für eine Betrachtung ab der (zurückliegenden) Herstellung des Bestandsbaus sprechen die Vollständigkeit der Analyse und die Vermeidung von Allokationen. Probleme dürften jedoch aufgrund fehlender Daten bei der Quantifizierung der in der Vergangenheit liegenden Anteile von LCA und LCC entstehen. Für eine Betrachtung ab dem gegenwärtigen Zeitpunkt spricht, dass die heutige Entscheidung die Vergangenheit nicht mehr beeinflussen kann. Der zurückliegende Teil des Gebäudelebenszyklus kann also abgeschnitten werden, zumal die in der Vergangenheit liegenden Anteile für alle Varianten gleich groß sind und damit der Fehler gleich groß ist. Diese Aussage gilt für die LCA uneingeschränkt, für die LCC bei der Berechnung der Annuität nur dann, wenn die Gesamtbetrachtungsdauer annähernd gleich lang ist, so dass sich gleiche Rentenbarwertfaktoren ergeben.

### 4.7 Bewertungsablauf

Mit den oben beschriebenen Lösungsansätzen kann der Ablauf einer Nachhaltigkeitsbewertung bei ungewissem Lebensweg wie folgt zusammengefasst werden (vgl. Abbildung 4-10):

Zu Beginn der Bewertung ist das Problem zu beschreiben und das Untersuchungsziel auszuformulieren. Auch die funktionalen Anforderungen sind zu Beginn der Untersuchung zu klären.

Im zweiten Schritt werden die Planungsvarianten des Untersuchungsgegenstands festgelegt und beschrieben. Um die Variantenzahl zu begrenzen, werden gegebenenfalls zunächst gröbere Obervarianten gebildet.

Die Varianten werden im dritten Schritt hinsichtlich ihrer Wechselwirkungen mit den Nachhaltigkeitszielen analysiert. Aus dem Kriterienkatalog werden die irrelevanten Kriterien gestrichen. Außerdem sind Überlegungen zur Einschränkung des Betrachtungsrahmens und der Wahl der passenden Bezugsgröße vorzunehmen.

Im vierten Schritt wird das Verfahren der Multikriterienbewertung auf den Anwendungsfall angepasst. Zunächst sind die Bewertungsmaßstäbe der Einzelkriterien festzulegen. Für Mindestkriterien ist die Mindestanforderung festzulegen. Für ordinale Kriterien ist ein Rating zur quasi-kardinalen Bewertung zu entwickeln. Für kardinale Kriterien ist der Verlauf der Nutzwertfunktion anzugeben. Hier wird festgelegt, ob der Bewertungsmaßstab anhand eines Referenzwertes oder anhand der Extremwerte der Entscheidungsmatrix (analog TOPSIS-Methode) festgelegt wird. Ferner sind die Gewichtungsfaktoren festzulegen.

Im fünften Schritt werden die Szenarien für den künftigen Lebensweg des Bauwerks entwickelt. Für jedes Szenario wird der zugehörige Lebensweg für das Gebäudemodell

abgeleitet. Die Zahl der Szenarien ist im Hinblick auf die spätere Bewertungsmatrix zu begrenzen. Trendbruchereignisse werden in eigenen Szenarien berücksichtigt.

Anschließend wird im sechsten Schritt die Entscheidungsmatrix aufgestellt, das heißt jede Variante wird in jedem Szenario in Bezug auf die Nachhaltigkeitsaspekte bewertet. Zunächst sind anhand der Mindestanforderungen ungültige Varianten von der weiteren Betrachtung auszuschließen. Wird dabei festgestellt, dass dies die Variantenzahl stark einschränkt oder im Extremfall keine gültige Variante existiert, so können entweder zusätzliche Varianten gebildet werden (Iterationsschleife zu Schritt 2) oder das Anforderungsniveau angepasst werden (Iterationsschleife zu Schritt 4). Die Auswertung der Einzelkriterien sowie die Aggregation zum Gesamtergebnis erfolgt zweckmäßigerweise mit Software-Unterstützung.

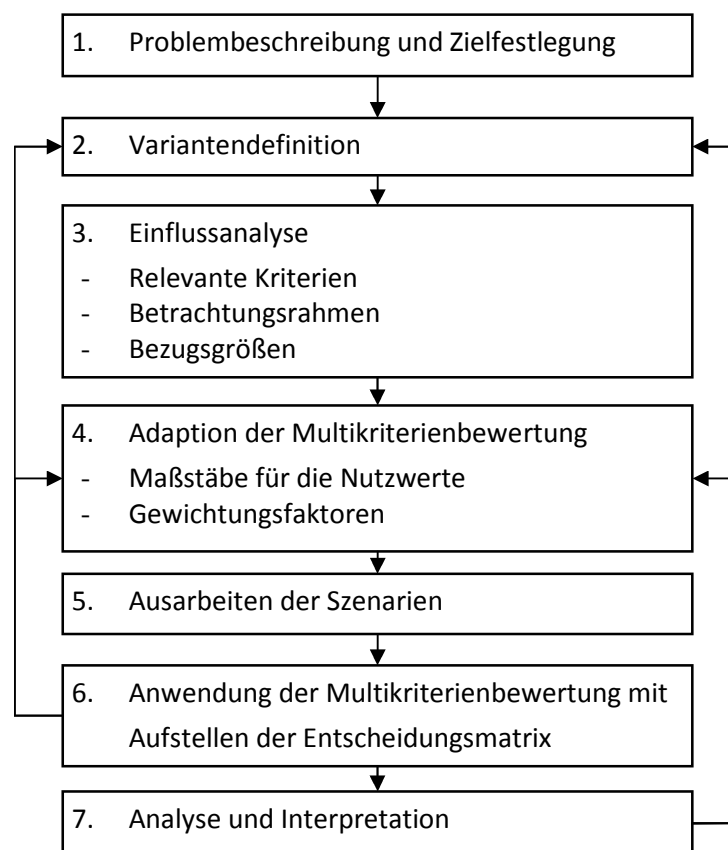


Abbildung 4-10: Schaubild zum Bewertungsablauf

Im letzten Schritt ist die Entscheidungsmatrix nach den oben dargestellten verschiedenen Maximen auszuwerten. Im Rahmen der Analyse ist eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Gewichtungsfaktoren oder der Bewertungsmaßstäbe für die Einzelkriterien hilfreich. Zu den vielversprechendsten Planungsvarianten können bei Bedarf detailliertere Untervarianten gebildet werden (neue Iteration ab Schritt 2). Aus den Ergebnissen werden schließlich Empfehlungen für die Planungsvarianten abgeleitet. Haben die Präferenzen

des Entscheiders großen Einfluss auf die Rangfolge, so kann eine Empfehlung für eine Variante nur in deren Verbindung einen Sinn ergeben. Ist die favorisierte Variante weitgehend unabhängig vom Entscheider, so kann diese praktisch uneingeschränkt empfohlen werden.

### 4.8 Zusammenfassung

In Kapitel 4 wurde ein Vorschlag für eine Nachhaltigkeitsanalyse unter Berücksichtigung des unbekannten Lebenszyklus entwickelt. Die Methodik ist in der Planungsphase im Rahmen der Variantenauswahl bei Realprojekten sowie in Forschung und Entwicklung anwendbar und bezieht sich ausschließlich auf bauwerksbezogene, nicht jedoch auf prozessbezogene Kriterien.

Der Lösungsansatz bestand darin, zunächst ein kardinales Analyseverfahren auf Grundlage der Nutzwertanalyse zu formulieren. Grundgedanke der anschließenden Lebenszyklus-Szenarienbewertung ist es, eine Entscheidungsmatrix der Planungsvarianten in verschiedenen Szenarien für den Lebensweg aufzustellen und diese zu analysieren.

Für das kardinale Analyseverfahren wurde ein Kriterienkatalog aus den Zielen nachhaltigen Bauens abgeleitet, der auf die jeweilige Aufgabenstellung anpassbar ist. Er enthält einerseits Kriterien, die als Mindestanforderungen betrachtet werden und bei Einhaltung der Baubestimmungen keinen wesentlichen Bewertungsaufwand verursachen. Andererseits enthält er Kriterien, die aus Lebenszyklusperspektive mit den Methoden der *Ökobilanz* und der *Lebenszykluskostenrechnung* quantifizierbar sind. Ergänzt wurde er um die kardinalen Kriterien *Frischwasserbedarf* und *Flächeninanspruchnahme*, die jedoch nur die Nutzungsphase einbeziehen. Außerdem enthält der Kriterienkatalog eine Reihe von ordinalen Kriterien, die dem BNB-System entnommen wurden. Für Ermittlung des Nutzwerts bei kardinal messbaren Kriterien wurde eine lineare Nutzwertfunktion vorgeschlagen. Die Bewertung von ordinalen Kriterien erfolgt quasi-kardinal durch Rating. Die Gewichtung der Kriterien ist vom Entscheider festzulegen. Hierzu wird der paarweise Vergleich nach der AHP-Methode oder ein Rückgriff auf bestehende Expertenurteile empfohlen.

In Abschnitt 4.6 wurde die Bedeutung der Stoffstrombilanz für die konsistente Erfassung der Szenarien bei der Kriterienbewertung herausgestellt. Ein schlüssiges Gebäudemodell und ein Lebenszyklusmodell, welche sich für die vorliegende Methodik eignen, wurden vorgestellt. Ausführlich wurden die einzelnen Lebensphasen dargestellt, aus denen sich für jedes Szenario eine neue Stoffstrombilanz ergibt. Die Bedeutung der funktionellen Einheit für die vorliegende Methodik wurde erläutert und als Bezugsgröße wurden Nutzfläche und Nutzungszeit vorgeschlagen. Zur besseren Verständlichkeit wurde im letzten Abschnitt der Bewertungsablauf, wie er sich für die Methodik ergibt, dargestellt.

## 5 ANWENDUNGSFELDER

### 5.1 Einführung

Bei der Nachhaltigkeitsbeurteilung von Bauwerken stellt sich häufig die Frage, wie es zu bewerten ist, wenn in einer Planungsvariante bestimmte Reserven für die Zukunft vorhanden sind. Typischerweise stehen bei solchen Fragestellungen einem heutigen Mehraufwand mögliche zukünftige Einsparungen gegenüber. Doch inwiefern tatsächlich Einsparungen umgesetzt werden können, hängt von Entwicklungen ab, die heute noch ungewiss sind. Dabei sind Aufwand und Einsparungen nicht rein finanziell zu deuten, sondern es kann sich auch um vermiedene Umweltbelastungen, eingesparte Ressourcen, etc. handeln. Im vorangegangenen Kapitel 4 wurde hierfür eine Methodik zur Nachhaltigkeitsanalyse bei ungewissem Lebensweg entwickelt. In diesem Kapitel sollen nun als typische Anwendungsfelder für die Methodik Fragestellungen wie Reinigungsfreundlichkeit, Instandhaltungsstrategie, Nutzerkomfort, Instandsetzungsfreundlichkeit, Umnutzungsfähigkeit und recyclinggerechtes Bauen näher betrachtet werden.

### 5.2 Reinigungsfreundlichkeit

Die Reinigung zählt zu den kostenintensivsten Betriebsprozessen von gewerblichen Immobilien. Sie verursacht nach *Rotermund* (2009) rund ein Fünftel der Betriebskosten (KG 300 nach DIN 18960). Daneben ist die Reinigung durch den Wasserverbrauch und den Einsatz von Reinigungsmitteln und Energie mit Umweltwirkungen verbunden. Konstruktionen, die Umfang und/oder Häufigkeit der notwendigen Reinigungsprozesse verringern, zählen daher zu den Strategien des nachhaltigen Bauens [BMVBS (2009a, S. 4.1.3/1)].

Mit der entwickelten Methodik können Planungsvarianten verglichen werden, die sich hinsichtlich ihrer Reinigungsfreundlichkeit voneinander unterscheiden. Dies kann z.B. die Ausgestaltung von Glasflächen, Fassaden, Sonnenschutzvorrichtungen, Fußbodenbelägen, Treppen und Sanitäreinrichtungen betreffen. Die Reinigungsfreundlichkeit von Außenglasflächen hängt zunächst von der Größe der Fläche ab, von eventuellen selbstreinigenden Eigenschaften und im Weiteren von ihrer Zugänglichkeit. Je nach Planung können die Flächen ohne Hilfsmittel zu erreichen sein, über fest installierte Hilfsmittel (Stege, Leitern, Außenaufzüge) verfügen oder nur mit externen Hilfsmitteln (Hubwagen, Sicherungsurte) zu erreichen sein. Ähnliches trifft auf die Fassade und die Sonnenschutzvorrichtungen zu. Bei der Planung von Bodenbelägen und Treppen können unempfindliche (z.B. dunkel meliert) oder empfindliche (z.B. uni hell) Farben und Strukturen gewählt werden. Details wie Sauberlaufzonen und Scheuerleisten verbessern die Reinigungsfreundlichkeit. Im Allgemeinen und insbesondere bei Sanitäreinrichtungen vergrößern Nischen, Vorsprünge und unzugängliche Ecken den Reinigungsaufwand.

Wie groß der Reinigungsaufwand jedoch tatsächlich sein wird, hängt auch von einigen unbekannten Parametern des zukünftigen Lebenswegs des Gebäudes ab. Die Entwicklung des Stundenlohns für Reinigungsleistungen im Vergleich zur allgemeinen Preissteigerung bestimmt, ob die Kosten für die Reinigung stark oder gemäßigt ansteigen. Wie häufig die einzelnen Gebäudebereiche gereinigt werden müssen, hängt zum einen von der Verschmutzung ab, die wiederum aus der Intensität der Nutzung resultiert, und zum anderen von den Ansprüchen der Nutzer. Außerdem steigt beispielsweise der Aufwand für die Bodenreinigung mit der Zahl der Möbel, die die Reinigung behindern. Auch ist eventuell unbekannt, welche Reinigungsmittel und -verfahren (Nass-/Trockenverfahren, mit/ohne Maschineneinsatz) eingesetzt werden und welche Ressourcenverbräuche und Umweltbelastungen sich somit ergeben. Die Einflüsse sind überschaubar und können durch entsprechende Szenarien abgebildet werden.

Die vorgestellte Methodik bietet damit die Möglichkeit, anhand relativ einfacher Szenarien verschiedene Planungsvarianten hinsichtlich ihrer Reinigungsfreundlichkeit zu vergleichen.

### 5.3 Instandhaltungsstrategie

Zur Instandhaltung zählen nach DIN 31051 Wartung, Inspektion und Instandsetzung. Die Wartung bezeichnet hierbei Maßnahmen zum Erhalt des Sollzustandes (z.B. Reinigung, Schmieren) während die Instandsetzung eine Maßnahme zur Wiederherstellung des Sollzustandes ist (z.B. Reparatur, Austausch). Die Inspektion bezeichnet eine Maßnahme zur Feststellung des aktuellen Zustands und dient der Früherkennung von Schäden. Während Wartung und Inspektion auf der einen Seite Kosten verursachen und mit Material- und Energieverbrauch verbunden sind, können sie auf der anderen Seite dazu beitragen, größere Instandsetzungen zu vermeiden und Bauteile und Anlagenkomponenten an ihre maximale Lebensdauer zu führen. Das sich daraus ergebende Optimierungsproblem tritt im Bauwesen nicht nur bei Gebäuden und ihren technischen Anlagen sondern insbesondere auch bei Infrastrukturbauwerken auf. Mit Hilfe der vorgestellten Methodik kann bestimmt werden, inwiefern eine konkrete Instandhaltungsstrategie an den Kriterien der Nachhaltigen Entwicklung ausgerichtet ist.

Planungsvarianten können dabei verschiedene Ausführungen von Konstruktionen umfassen. Die Anwendungsbereiche sind vielfältig, als Beispiel sei hier Stahl- und Spannbeton unter besonderen Umwelteinflüssen genannt, wie sie die durch die Expositionsklassen nach DIN 1045-1 charakterisiert sind. Typische Bauwerke sind z.B. Fahrbereiche von Straßenbrücken und Parkdecks mit Frost-Tausalz-Angriff. Der Widerstand gegenüber diesen Umwelteinflüssen hängt zunächst vom Beton (Zementgehalt, Festigkeitsklasse, Luftporengehalt etc.) und der Betondeckung des Stahls ab. Des Weiteren können die Planungsvarianten mit verschiedenen Strategien verknüpft werden,

die ein unterschiedliches Maß an Wartung, Inspektion und Instandhaltung vorsehen. Zwar erfolgt in der Regel keine Wartung an Betonkonstruktionen, jedoch spielt die Inspektion eine wichtige Rolle. Die Varianten können sich z.B. darin unterscheiden, welche Stellen für eine Inspektion zugänglich sind, oder ob eine „fortlaufende Inspektion“ durch in den Beton eingebrachte Monitoring-Instrumente möglich ist.

Unbekannte Parameter im Lebensweg des Bauwerks sind die tatsächlich auftretenden Umwelteinflüsse und der sich daraus ergebende Bauwerkszustand. Je nach Zustand des Bauwerks sind entsprechende Instandsetzungsmaßnahmen zu ergreifen. Typischerweise sind zur Früherkennung derjenigen Bauwerkszustände, bei denen mit noch verhältnismäßig kleinen Instandsetzungsmaßnahmen reagiert werden kann, umfangreichere Inspektionsmaßnahmen nötig. Mit der vorgestellten Methodik können in Szenarien verschiedene Umwelteinflüsse (z.B. harte/milde Winter, viel/wenig Taumitteinsatz) abgebildet werden. Mit Hilfe von Methoden aus dem Gebiet der probabilistischen Lebensdauerbemessung kann bei vorgegebenen Umwelteinflüssen der Bauwerkszustand prognostiziert werden [vgl. hierzu weiterführend z.B. Gehlen (2000), Schießl & Mayer (2009)]. Bei Varianten mit Früherkennung wird dann zu einem relativ frühen Zeitpunkt mit kleinen Instandsetzungsmaßnahmen reagiert, bei anderen Varianten wird entsprechend spät mit umfangreicheren Maßnahmen reagiert.

Durch die Nachhaltigkeitsbewertung bietet sich damit die Möglichkeit, verschiedene Instandhaltungsstrategien zu vergleichen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass sowohl Ökobilanzdaten als auch Kostenansätze für unterschiedliche Inspektions- sowie Instandsetzungsmaßnahmen vorliegen. Diese fehlen bislang in den aktuellen Datenbanken, die vornehmlich auf den Geschossbau ausgerichtet sind (z.B. BMVBS (2009b), GaBi 4 (2007)).

## **5.4 Nutzerkomfort**

Vor ein besonderes Problem werden Bewertende bei der Nachhaltigkeitsbeurteilung gestellt, wenn Aspekte der Nutzungsqualität zu quantifizieren und gegenüber ökologischen und ökonomischen Aspekten in Bezug zu setzen sind. Die Bewertung erfolgt in bestehenden Systemen in Form eines Ratings. Dabei hat der Nutzerkomfort eine indirekte Wirkung auf ökologische und ökonomische Nachhaltigkeitsziele. Nur ein behagliches, ansprechendes, funktionales Gebäude kann seinen Zweck in besonderem Maße erfüllen. Es rechtfertigt damit überhaupt erst den ökologischen und ökonomischen Aufwand für seine Erstellung und erhöht durch größere Akzeptanz der Nutzer die Chance auf eine werthaltige und werterhaltende Nutzung.

Mit der vorgestellten Methodik können einzelne Fragestellungen aus diesem Wirkungsgeflecht analysiert werden. Als Beispiel sei hier der thermische Komfort im Sommer dargestellt, da die sommerliche Überhitzung ein typisches Problem moderner

Bürogebäude (hohe Wärmelasten, hoher Fensterflächenanteil) darstellt. Zwar können Grenzwerte für die sommerliche Überhitzung als Mindestanforderung an die Varianten formuliert werden. Doch auch unterhalb der Grenzwerte vermindern unangenehm warme Temperaturen die Leistungsfähigkeit der Nutzer und führen zu Unzufriedenheit – die Nutzerakzeptanz sinkt. Langfristig kann dies bedeuten, dass ein Gebäude schlechter zu vermieten ist, häufiger leer steht und daher nachgerüstet werden muss oder gar durch einen Neubau ersetzt wird.

Planungsvarianten können sich hinsichtlich der Maßnahmen für den sommerlichen Wärmeschutz unterscheiden. Passive Maßnahmen umfassen z.B. Sonnenschutzverglasung, außen- bzw. innenliegenden Sonnenschutz oder die thermische Ankopplung von Bauteilen. Eine wirkungsvolle, jedoch auch kosten- und energieaufwändige, aktive Maßnahme ist hingegen die Kühlung.

Unbekannte Parameter im Lebensweg eines Gebäudes sind zum einen die Klimaentwicklung, und zum anderen die Frage, wie stark sich eine sinkende Akzeptanz auf die Nutzung des Gebäudes auswirkt. Beides kann mit Szenarien erfasst werden. Ausgehend von Vorgaben zum Klima (normale / extrem warme Sommer) können mit Hilfe einer thermischen Simulation nach DIN EN 15251 die stündlichen Operativtemperaturen in einem Raum bestimmt werden. Mit diesen Temperaturprofilen kann zunächst die Überhitzungszeit bestimmt werden. Darüber hinaus kann mit Behaglichkeitsmodellen der Anteil der Unzufriedenen prognostiziert werden (DIN EN ISO 7730). In den Szenarien kann eine unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber dem Anteil der Unzufriedenen simuliert werden, indem jeweils Reaktionen (keine Maßnahme / Leerstand / Nachrüstung / Abriss) zugeordnet werden.

Bei der Nachhaltigkeitsbeurteilung sollte für die Überhitzung ein Maximalwert vorgegeben werden, um ungültige Varianten identifizieren zu können. Daneben werden die getroffenen Maßnahmen (Nachrüstung, Abriss) mit den Lebenszyklusmethoden LCA und LCC bewertet. Leerstände können dabei wie eine Verringerung der Nutzfläche behandelt werden, wenn von der Nutzfläche lediglich der tatsächlich vermietete Anteil betrachtet wird. Neben dem thermischen Komfort im Sommer können in ähnlicher Weise auch andere Aspekte, z.B. der visuelle Komfort, die Einflussnahme der Nutzer, etc. bewertet werden.

### **5.5 Instandsetzungsfreundlichkeit**

Instandsetzungen sind fester Bestandteil im Lebenszyklus von Gebäuden. Seien es nun die planmäßigen Instandsetzungen, die mit Erreichen der Lebensdauer einzelner Komponenten regelmäßig zu erwarten sind, oder die unplanmäßigen Instandsetzungen, die durch unvorhergesehene Schadensereignisse ausgelöst werden. Da Instandsetzungsmaßnahmen mit erheblichen Kosten sowie Umweltbelastungen verbunden sein können, liegt es nahe,

ihnen bereits bei der Planung eines Gebäudes Beachtung zu schenken. Bei instandsetzungsfreundlichen Gebäuden sind Schäden weniger wahrscheinlich oder die erforderlichen Maßnahmen weniger umfangreich, weniger aufwändig und schneller durchzuführen. Im weiteren Sinne führt auch Robustheit zu instandsetzungsfreundlicheren Gebäuden und kann bewertet werden, da schadenvermeidende bzw. schadenstolerante Konstruktionen seltener oder einfacher instandzusetzen sind.

Bei der Planung instandsetzungsfreundlicher Gebäude kann insbesondere auf die Modularität der Systeme und die leichte Trennbarkeit von Verbindungen geachtet werden. Mit dieser Strategie kann die Eingriffstiefe von Instandsetzungsmaßnahmen verringert werden. Es können einzelne Komponenten gezielt ersetzt werden, ohne ganze Systeme tauschen zu müssen, was Kosten und Ressourcen spart. Ist beispielsweise ein Bodenbelag vollflächig verklebt, so wird beim Austausch der darunterliegende Estrich beschädigt und muss verspachtelt werden. Ist der Bodenbelag schwimmend verlegt, so ist ein Austausch ohne Beeinträchtigung der angrenzenden Schichten möglich. Bei Spannbetonbrücken hat sich die verbundlose externe Vorspannung verbreitet, da Spannglieder einzeln ausgetauscht werden können. Vorgehängte Fassaden erlauben es, einzelne Fassadenelemente auszutauschen ohne die ganze Fassade erneuern zu müssen.

Eine weitere Strategie besteht darin, Materialien nach ihrer Weiter- oder Restnutzbarkeit nach Schadensereignissen auszuwählen. Die Beispiele sind vielfältig: Ein Fliesenbelag, der wegen einer Überschwemmung, eines Leitungsschadens, etc. unter Wasser stand, kann nach seiner Reinigung weitergenutzt werden, während ein aufgequollener Parkettboden ausgetauscht werden muss. Bauteile aus mineralischen Baustoffen sind nichtbrennbar und können daher nach einem Brand bei entsprechender Resttragfähigkeit weitergenutzt werden. Fassaden mit Anti-Graffiti-Ausrüstung können im Schadensfall leicht gereinigt werden.

Unbekannt ist zum Zeitpunkt der Planung jedoch, ob ein Gebäude später tatsächlich von derartigen Vorkehrungen profitieren kann. Zum einen ist nicht bekannt, ob ein Schadensereignis eintreten wird. Zum anderen kann bezweifelt werden, ob tatsächlich von der Möglichkeit eines modularen Austauschs Gebrauch gemacht werden wird. Die nötigen Ersatzteile (z.B. von technischen Anlagen, Fassaden, etc.) könnten nicht mehr verfügbar sein. Es könnte ohnehin eine Modernisierung anstehen, so dass ganze Systeme erneuert werden. Bei Anwendung der vorgestellten Methodik können alle denkbaren Fälle durch Szenarien abgebildet werden. Schadensfälle können darüberhinaus mit Eintrittswahrscheinlichkeiten verknüpft werden. In der Nachhaltigkeitsbewertung werden die daraus resultierenden Instandsetzungsmaßnahmen dann quantifiziert und über den gesamten Lebenszyklus bewertet.

Insgesamt ermöglicht die Methodik eine Analyse vieler interessanter Fragestellungen aus dem Gebiet der Instandsetzung und der Robustheit.



### 5.6 Umnutzungsfähigkeit

Es wird allgemein anerkannt, dass das Themenfeld der Umnutzungsfähigkeit von nicht zu unterschätzender Bedeutung für das nachhaltige Bauen ist [BMVBS (2009c, S. 3.2.3/1)]. Nachhaltig konzipierte Gebäude sind so geplant und umgesetzt, dass sie an veränderte Anforderungen angepasst werden können. Neue Anforderungen können sowohl durch Nutzerwechsel als auch durch den technischen Fortschritt, Gesetzesänderungen oder Technologiewechsel hervorgerufen werden. Mit der Anpassungsfähigkeit wird die Grundlage für zukunftsfähige Gebäude und lange Nutzungsdauern geschaffen. Meist ist das Einplanen einer hohen Umnutzungsfähigkeit mit vergrößerten Anfangsinvestitionen an finanziellen und ökologischen Ressourcen verbunden. Sie sollen sich dadurch amortisieren, dass ein späterer Wandel mit geringem Ressourceneinsatz realisiert werden kann.

Die planerischen Lösungsansätze für eine gezielte Umnutzungsfähigkeit sind vielfältig und betreffen sowohl die Tragstruktur als auch den Ausbau und die Gebäudetechnik. Sie reichen von größeren Raumhöhen, stützenfreien Grundrissen und leicht versetzbaren Trennwänden über modulare Anlagentechnik, zukunftsfähige BUS-Systeme, freie Kapazitäten der Versorgungsleitungen bis hin zu Tragwerken mit flexibler Anordnung der Elemente.

Der Lebensweg des Bauwerks ist bei der Planung jedoch unbekannt. Welche Umnutzungen aus welchen Gründen einmal erfolgen werden, kann jedoch mit Szenarien ergründet werden. Für Büronutzungen sind z.B. Grundrissänderungen und Neuaufteilungen von Nutzungseinheiten möglich. Für Wohnnutzungen sind z.B. Anpassungen an das Wohnen im Alter plausibel. An manchen Standorten sind Nutzungsänderungen zwischen den Nutzungsarten Büro, Wohnen, Hotel, Gewerbe, Handel denkbar. Auch Teilumbauten eines Objektes kommen in Betracht. Verschiedene Lebenswege können auch hier durch Szenarien abgebildet werden.

Bei Anwendung der vorgestellten Methodik wird dann die Konsequenz für die verschiedenen Planungsvarianten gezogen. Sie kann für umnutzungsfähige Varianten einen verminderten Umbauaufwand mit einer Zeit-, Kosten- und Ressourcenersparnis bedeuten und für andere Varianten tiefgreifende bauliche Änderungen bis hin zu Abriss und Neubau. In der Nachhaltigkeitsbewertung über den gesamten Lebenszyklus zeigt sich schließlich die Sinnhaftigkeit bestimmter Lösungsansätze.

## 5.7 Recyclinggerechtes Bauen

Abfall und Abfallvermeidung sind gerade für das Bauwesen wichtige Fragestellungen unter dem Vorzeichen der Nachhaltigkeit. Am deutschen Abfallaufkommen hatten die Bau- und Abbruchabfälle im Jahr 2007 einen Massenanteil von 52%. Sie betrugen rund 202 Mio. t, wovon 8,7 Mio. t auf gefährliche Abfälle entfielen [Statistisches Bundesamt (2009c, S. 48–49)]. Zwar beträgt die Recyclingquote der Bauabfälle (ohne Bodenaushub) derzeit 68,5 %, jedoch ist der Anteil der Recyclingbaustoffe, die einer hochwertigen Verwendung zugeführt werden mit 4,9 % noch gering [ARGE KWB (2007, S. 15)]. Das Recycling stellt jedoch einen wichtigen Weg zur Umwelt- und Ressourcenschonung dar. Es zählt daher zu den Strategien nachhaltigen Bauens, Gebäude bereits heute so zu planen, dass sie später einem hochwertigen Recycling zugeführt werden können.

Planungsvarianten können sich in mehrerlei Hinsicht unterscheiden. Unterschiedliche Materialien kommen für jeweils verschiedene Verwertungen (z.B. Rückführung in den Produktkreislauf, thermische Verwertung) infrage. Materialverbindungen machen verschiedene Rückbauverfahren (z.B. Abschrauben, Abstemmen) erforderlich. Problemstoffe und schlecht trennbare Verbundstoffe erschweren ein hochwertiges Recycling.

Jedoch sind die Bedingungen, unter denen ein Gebäude einmal rückgebaut werden wird, unbekannt. Die Wahl des Abbruch- bzw. Rückbauverfahrens wird unter Abwägung von personellem und maschinellen Aufwand, Entsorgungspreisen und erzielbaren Einnahmen für Wertstoffe getroffen. Änderungen der gesetzlichen Vorgaben sind möglich. Schließlich stellt sich die Frage, wie zukünftige Aufbereitungstechnologien ökologisch zu bewerten sind.

Die unbekannten Parameter können mit Hilfe der vorgestellten Methodik in Szenarien umgesetzt werden. Ein Ausgangsszenario stellt dabei der heutige Stand der Technik mit den heutigen Recyclingquoten dar. Für weitere Szenarien können Effizienzsteigerungen bei der Technologie, höhere Recyclingquoten, verschiedene Preisentwicklungen etc. angenommen werden. In Trendbruchszenarien könnte der Fall abgebildet werden, dass ein aus heutiger Sicht unproblematischer Abfall in Zukunft als Problemstoff betrachtet wird und eine besondere Entsorgung erfordert.

Für die anschließende Nachhaltigkeitsbewertung sind Ökobilanzprofile für die Entsorgungswege in detaillierterer Form zu erarbeiten, als sie in derzeitigen Datenbanken (z.B. BMVBS (2009b), GaBi 4 (2007)) vorhanden sind. Dabei ist insbesondere auf die konsistente Abgrenzung zwischen Erst- und Folgenutzung der Materialien und die Verrechnung von Einsparungen zu achten. Insgesamt stellt die durch Ungewissheit geprägte Nachhaltigkeitsbewertung von Entsorgungsszenarien ein typisches Anwendungsbeispiel für die hier vorgestellte Methodik dar.

### 5.8 Zusammenfassung

Im vorliegenden Kapitel 5 wurden als mögliche Anwendungsfelder für die entwickelte Methodik sechs unterschiedliche Themenfelder näher beleuchtet.

Bei allen Themen besteht ein Zusammenhang mit dem Nachhaltigen Bauen, der sich indirekt auf die Nachhaltigkeitskriterien auswirkt. Hier können Baukonstruktionen dahingehend beurteilt werden, ob sie für den Lebensweg des Gebäudes Chancen oder Reserven bieten. Die Methodik ist aufgrund ihrer Anpassbarkeit auf alle genannten Themenstellungen anwendbar und kann sicher auf weitere Fragestellungen übertragen werden. Zum Teil stehen einer sofortigen Anwendung jedoch noch Datenlücken bei Basisdaten entgegen, wie z.B. bei Instandsetzungsmaßnahmen.

## **6 ANWENDUNG DER ENTWICKELTEN METHODIK AN EINEM BEISPIELGEBÄUDE**

### **6.1 Einführung**

In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine Methodik zur Nachhaltigkeitsanalyse von Baukonstruktionen bei ungewissem Lebensweg vorgeschlagen und als mögliches Anwendungsfeld unter anderem die Umnutzungsfähigkeit von Gebäuden aufgezeigt.

Im sechsten Kapitel soll nun ein ausführliches Beispiel die Vorgehensweise veranschaulichen. Die Fragestellung besteht darin, die Nutzungsflexibilität eines innerstädtischen Geschossbaus zu beurteilen. Hierzu werden die einzelnen Bewertungsschritte gemäß Abbildung 4-10 detailliert nachvollzogen. Die Aufstellung von Ökobilanz und Lebenszykluskostenrechnung, die aufgrund der Zahl der Szenarien zwar zeitaufwändig jedoch für jedes Szenario analog ist, wird nur kurz dargestellt. Besonderes Augenmerk wird auf die Ableitung der Szenarien und die Analyse und Interpretation gelegt.

### **6.2 Problembeschreibung und Zielfestlegung**

Die Planung und Umsetzung flexibler Gebäudestrukturen wird als wichtige Strategie zur Förderung des nachhaltigen Bauens betrachtet. Eine flexible Struktur kann mit einem geringen Ressourceneinsatz an neue Anforderungen angepasst werden [BMVBS (2009c, S. 3.2.3/1)]. Da diese Flexibilität nur um den Preis einer höheren Anfangsinvestition, sowohl in ökonomischer als auch in ökologischer Sicht, erreicht werden kann, stellt sich die Frage nach der Angemessenheit der geplanten Flexibilität [Plagaro Cowee & Schwehr (2008, S. 22)]. Diese kann nicht pauschal sondern nur anhand konkreter Konstruktionen in konkreten Situationen beurteilt werden.

Die Untersuchung soll zeigen, wie sich die Wahl des Deckensystems auf die Nutzungsflexibilität und damit auf die Nachhaltigkeit auswirkt. Insbesondere soll die Vorteilhaftigkeit eines neuartigen flexiblen Deckensystems im Vergleich zu herkömmlichen Bauweisen untersucht werden. Die Bewertung wird an einem exemplarischen Gebäude durchgeführt. Bei diesem Beispielgebäude handelt es sich um den Entwurf eines innerstädtischen Mehrgeschossbaus mit Tiefgarage. Er wurde im Rahmen des BMBF-DAfStb-Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“ [DAfStb (2010)] als Untersuchungsgegenstand kreiert. Die funktionalen Anforderungen ergeben sich implizit aus der Nutzungsart.

### 6.3 Variantendefinition

Für die Untersuchung wurden zwei Varianten des Beispielgebäudes betrachtet: Eine herkömmliche und eine flexible Bauweise, die jeweils für eine Büronutzung und eine Wohnnutzung konzipiert sind.

Das Gebäude ist ausführlich im Dossier zum Forschungsvorhaben [DAfStb (2010)] beschrieben, so dass die Darstellung hier auf die wesentlichen Merkmale beschränkt wird.

Das Gebäude ist für eine typische innerstädtische geschlossene Häuserzeile entworfen. Es besitzt 6 Obergeschosse sowie 2 Untergeschosse. Die Gebäudehöhe wird durch die Hochhausgrenze auf 22 m beschränkt. Die Breite des betrachteten Ausschnitts beträgt 30 m bei einer Tiefe von 15,60 m. Für diese Fläche (vgl. Abbildung 6-1) gibt es drei exemplarische Grundrisse für unterschiedliche Nutzungen: ein am klassischen Zellenbüro orientierter Bürogrundriss mit Kernzone, eine offene Bürolandschaft als modernes Team-Center, sowie ein Apartmentgrundriss mit sechs Wohneinheiten unterschiedlicher Größe. Die Untergeschosse werden als Tiefgarage genutzt. Auf beiden Seiten des betrachteten Grundriss-Ausschnitts befinden sich Treppenhäuserkerne, die der Erschließung und Aussteifung dienen.

Für das Beispielgebäude wurden im oben genannten Forschungsvorhaben verschiedene konstruktive Lösungen formuliert, die jeweils eine Variante bilden. Tragsystem und Anlagentechnik sind für jede Variante entsprechend der Anforderungen nach heutigem Stand der Technik bemessen.

Ansatzpunkt bei der Variantendefinition sind unterschiedliche Geschossdecken, die zu den Varianten „Herkömmliche Tragstruktur“ und „Flexible Tragstruktur“ führen. Zur flexiblen Struktur gibt es zwei Untervarianten (a) und (b), die sich durch einen unterschiedlichen Fußbodenaufbau auszeichnen.

Die Definition der Strukturen, die nicht nur die Wahl des statischen Systems und dessen Dimensionierung umfasst, sondern bis zur material- und mengenmäßigen Konfiguration jedes Bauteils mit allen seinen Schichten reicht, erfolgte im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens Nachhaltig Bauen mit Beton. Dreßen (2010) erläutert zur Wahl der herkömmlichen Tragstruktur:

„Im Geschossbau werden die Tragsysteme heute aus dem Entwurf abgeleitet. Für Bürogebäude kommen daher meist Flachdecken auf Stützen zur Ausführung, da sie eine beliebige Raumaufteilung ermöglichen. Zur Unterbringung der Gebäudetechnikleitungen werden i. A. Abhangdecken erforderlich. Im Wohnungsbau werden die Wohnungsgrößen und Raumaufteilung bei der Planung individuell entsprechend den jeweiligen Anforderungen festgeschrieben, wobei eine Neuaufteilung von Räumen oder ganzen Wohnungen nur selten in Erwägung gezogen wird. In der Regel sind die Stützweiten im Wohnungsbau begrenzt und der Anteil an tragenden Innenwänden hoch.“

Es wird ersichtlich, dass die Umnutzungsoptionen bei herkömmlicher Bauweise begrenzt sind. Während innerhalb eines Bürogebäudes Neuaufteilungen der Grundrisse noch möglich sind, scheidet eine Umnutzung von Büros zu Wohnen oder umgekehrt aus. Die Reaktionsmöglichkeiten sind in diesem Fall beschränkt auf das Nichtstun mit Inkaufnahme von Leerständen, das Improvisieren unter erheblichen Einschränkungen der Funktionalität oder den Abriss mit anschließendem Neubau. Die flexible Tragstruktur wird hingegen mit dem Anspruch entworfen, gerade solche Umnutzungen unter Beibehaltung der Primärstruktur zu ermöglichen. Für die herkömmliche Bauweise wird stattdessen die Option mit Abriss und Neubau gewählt, es muss also für jede Nutzung eine herkömmliche Tragstruktur definiert werden.

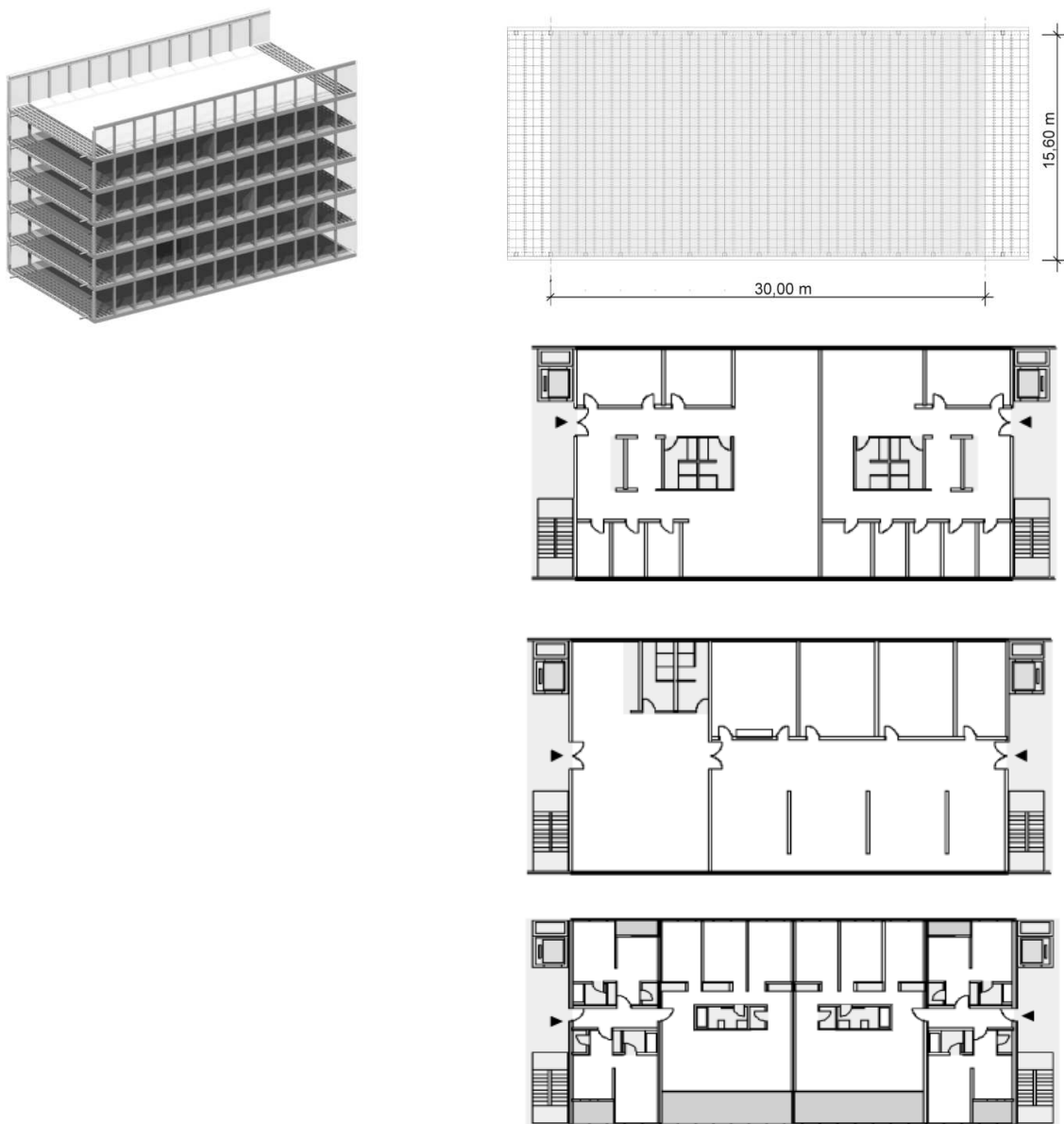


Abbildung 6-1: Beispielgebäude mit den Grundrissen Zellenbüro, Team-Center und Apartments  
[DAfStb (2010, S. 17, 20)]

Für die herkömmliche Bauweise des Bürogebäudes ist eine Flachdecke von 26 cm Dicke auf zwei Innenstützenreihen und zwei Außenstützenreihen vorgesehen. Die Aussteifung des Gebäudes erfolgt – wie in allen Varianten – über die beiden seitlichen Kerne. Der Deckenbelag besteht aus einem schwimmenden Estrich, der als Bodenbelag Teppich (für gewerbliche Nutzung im Büro) oder Fliesen (im Sanitärbereich) erhält. Zur Unterbringung von Installationsleitungen wird eine abgehängte Decke installiert. Das Wohngebäude in herkömmlicher Bauweise erhält eine Flachdecke von 24 cm Dicke auf tragenden Wänden aus unbewehrtem Beton und Stahlbeton. Der Deckenbelag besteht ebenfalls aus einem schwimmenden Estrich, jedoch sind hier als Bodenbelag Parkett, Naturstein (in den Fluren) und Fliesen (in Sanitärbereichen) vorgesehen. Im Gegensatz zum Büro erhält das reine Wohngebäude keine abgehängte Decke.

Tabelle 6-1: Aufbau der herkömmlichen Decke für Büronutzung (Decke Typ 1a)  
[nach DAfStb (2010)]

Schicht	Material	Dicke [cm]	mittlere Lebensdauer [Jahre]
Bodenbelag	nach Erfordernis (Teppich/Fliesen)	0,5/1	10/50
Estrich	Zementestrich	6	80
Trittschalldämmung	Polystyrol Hartschaum	3	80
Tragschicht	Ortbetonflachdecke (Stahlbeton C25/30)	26	100
Abhangdecke	Metallkonstruktion	9,5	50
	Gipskartonplatte	1,25	50
Vorbehandlung	Spachtelung	0,2	50
Oberflächenbeschichtung	Mineralfarbe	0,03	20

Tabelle 6-2: Aufbau der herkömmlichen Decke für Wohnnutzung (Decke Typ 1b)  
[nach DAfStb (2010)]

Schicht	Material	Dicke [cm]	mittlere Lebensdauer [Jahre]
Bodenbelag	nach Erfordernis (Fliesen/Parkett/Naturstein)	1,5/1/1	80/50/50
Estrich	Zementestrich	6	80
Trittschalldämmung	Polystyrol Hartschaum	3	80
Tragschicht	Ortbetonflachdecke (Stahlbeton C25/30)	24	100
Vorbehandlung	Spachtelung	0,2	100
Oberflächenbeschichtung	Mineralfarbe	0,03	20

Für die herkömmliche Variante werden daher je nach Nutzungsart die in Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 dargestellten Bauteilaufbauten (Decke Typ 1a und Decke Typ 1b) verwendet.

Im Forschungsvorhaben wurde für die flexible Struktur des Beispielgebäudes eine weitgespannte Spannbetonstegplatte als Deckentragsystem mit integrierten Gebäudetechnikleitungen innerhalb des Deckenquerschnitts entwickelt (vgl. Abbildung 6-2). Plattenelemente aus Calciumsulfatplatten bzw. Betonfertigteilen verschließen den Hohlraumboden und nehmen den Bodenbelag auf. Die Deckenunterseite wird glatt verspachtelt und gestrichen. Der Zugang zu allen Technikleitungen kann vom selben Geschoss aus ohne Störung der Nutzer in anderen Geschossen erfolgen. Zwischen den Fassaden bleibt der Grundriss stützenfrei und bietet damit die größtmögliche Freiheit für die Grundrissgestaltung. Die Tragfähigkeit der Decke erlaubt sowohl ein Wohn- als auch eine Büronutzung.

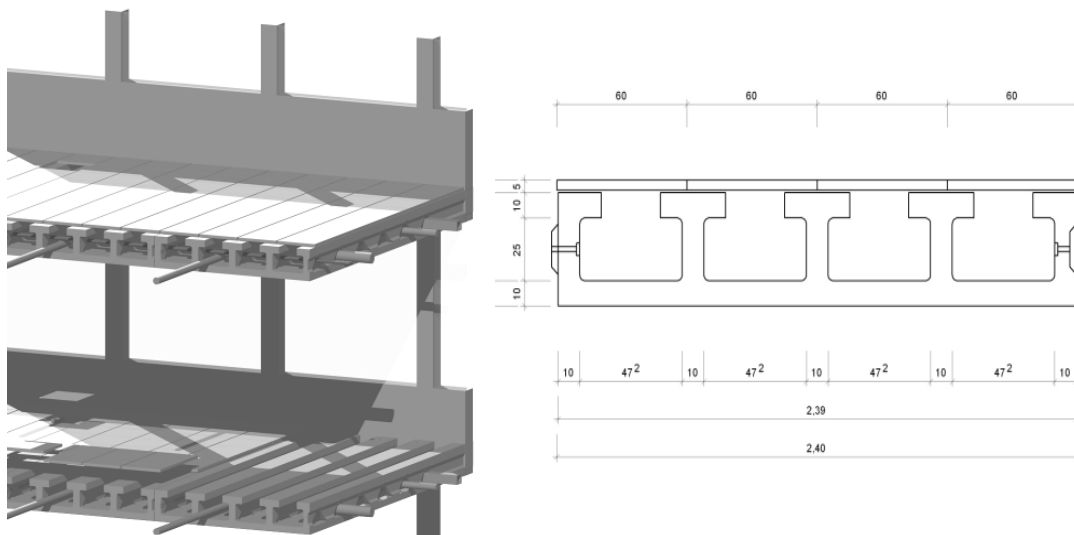


Abbildung 6-2: Prinzipskizze und Querschnitt der flexiblen Decke [NBB, TPC ibac, RWTH Aachen]

Für die flexible Struktur werden zwei Untervarianten gebildet die sich nur in den Geschossdecken durch die verwendeten Plattenelemente des Hohlraumbodens geringfügig unterscheiden. Die Variante „Flexible Tragstruktur (a)“ besitzt mit der Decke Typ 2 Calciumsulfat-Plattenelemente, die Variante „Flexible Tragstruktur (b)“ mit Decke Typ 3 Betonfertigteilplatten (vgl. Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4).



## 6 Anwendung der entwickelten Methodik an einem Beispielgebäude

*Tabelle 6-3: Aufbau der flexiblen Decke mit Calciumsulfatplatte (Decke Typ 2)  
[nach DAfStb (2010)]*

Schicht	Material	Dicke [cm]	mittlere Lebensdauer [Jahre]
Bodenbelag	nach Erfordernis (Teppich/ Fliesen/Klebeparkett/Naturstein)	0,5/1,5/1/1	10/80/50/50
Doppelboden	Calciumsulfatplatte	4	70
Trittschalldämmung	Polystyrol Hartschaum	3	70
Tragschicht	Fertigteilstegplatte (Spannbeton C50/60)	47	100
Vorbehandlung	Spachtelung	0,2	100
Oberflächenbeschichtung	Mineralfarbe	0,03	20

*Tabelle 6-4: Aufbau der flexiblen Decke mit Betonfertigteilstegplatte (Decke Typ 3)  
[nach DAfStb (2010)]*

Schicht	Material	Dicke [cm]	mittlere Lebensdauer [Jahre]
Bodenbelag	nach Erfordernis (Teppich/Fliesen/Klebeparkett/Naturstein)	0,5/1,5/1/1	10/80/50/50
Doppelboden	Betonfertigteilstegplatte	6	70
Trittschalldämmung	Polystyrol Hartschaum	3	70
Tragschicht	Fertigteilstegplatte (Spannbeton C50/60)	47	100
Vorbehandlung	Spachtelung	0,2	100
Oberflächenbeschichtung	Mineralfarbe	0,03	20

Im Vergleich stellen sich die herkömmlichen und die flexiblen Deckenvarianten nicht nur in der Materialwahl sondern auch in der Gesamtdicke unterschiedlich dar (vgl. Abbildung 6-3). Daneben unterscheiden sich die Varianten auch im Aufbau weiterer Bauteile, z.B. der Dachdecke, der Innenwände, der Stützen. Der Bauteilaufbau wurde jedoch so gewählt, dass die Varianten in ihrem äußeren Erscheinungsbild einheitlich sind und damit weitestgehend die gleiche Funktionalität bieten. Dies betrifft z.B. die Fassadengestaltung, die Boden- und Wandbeläge, etc. Ausführlich werden Bauteilaufbauten und Konstruktionen zum herkömmlichen Gebäude und dem flexiblem Gebäude im Dossier zum Forschungsvorhaben Nachhaltig Bauen mit Beton [DAfStb (2010)] dargestellt.

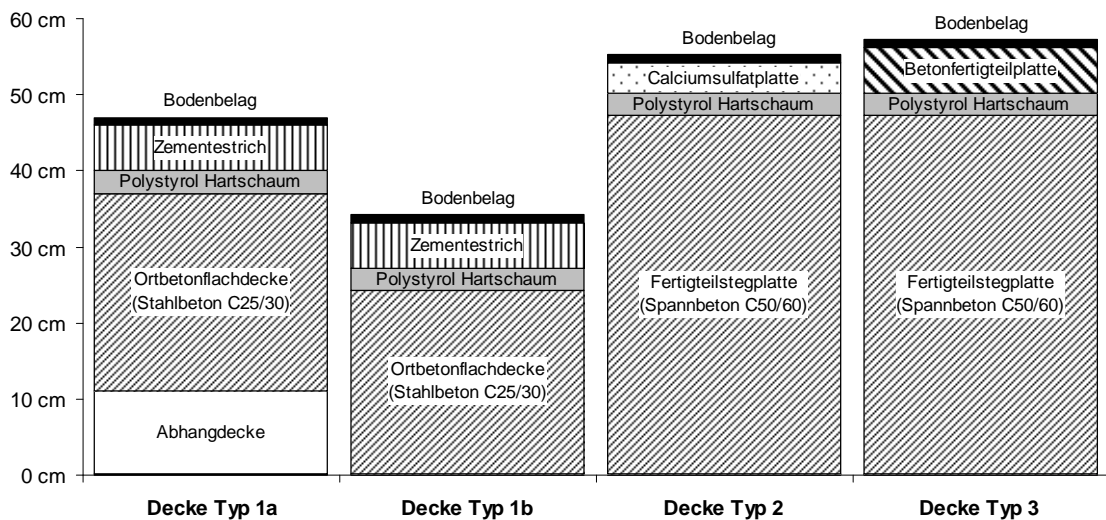


Abbildung 6-3: Schichtaufbau der Deckenvarianten [eigene Darstellung nach DAfStb (2010)]

## 6.4 Einflussanalyse

Nach der Definition der Varianten ist zunächst zu prüfen, wie der Betrachtungsrahmen gewählt werden muss, um das Problem vollständig zu erfassen. Außerdem ist die geeignete Bezugsgröße festzulegen. Danach sind die relevanten Kriterien für die Untersuchung abzuleiten.

Der **Betrachtungsrahmen** ergibt sich aus den folgenden Überlegungen:

Das Deckensystem ist durch das eingesetzte Material, seine Kosten, das Tragverhalten (aufnehmbare Lasten, Anordnung von Stützen und tragenden Wänden), die Konstruktionshöhe und bauphysikalische Eigenschaften gekennzeichnet. Es kann jedoch nicht einzeln, d.h. im Vergleich von jeweils 1 m<sup>2</sup> Deckenkonstruktion, betrachtet werden. Viele weitere Bauelemente und Bauteile werden auf die Deckenkonstruktion abgestimmt und müssen daher in die Beurteilung einfließen. Zunächst sind Bodenaufbau und Deckenbekleidung eng mit der Konstruktionsart der Decke verbunden: Bei Flachdecken, Unterzugdecken oder Systemdecken bieten sich jeweils unterschiedliche Lösungen, wie Abhangdecke oder Doppelboden an. Auch die Innenwände werden durch die Deckenkonstruktion mitbestimmt, da entweder tragende Wände oder leichte bzw. massive Trennwände zum Einsatz kommen können. Deckensysteme bestimmen über unterschiedlichen Lastabtrag schließlich die Zahl und Lage von Stützen und Wänden, bis hin zu eventuell nötigen Abfangungen und der Gründung. Auch das Tragsystem des Flachdachs als oberster Geschossdecke ist von den vertikalen Traggliedern der darunterliegenden Geschosse abhängig. Die Decke ist also im Zusammenspiel mit den anderen Bauteilen und dem Ausbau zu beurteilen. Der Betrachtungsrahmen sollte aus diesem Grund die gesamte Baukonstruktion (KG 300 im Sinne von DIN 276-1) des

betrachteten Grundrissausschnitts umfassen. Der Treppenhauskern als Erschließungszone wird dabei aus der Betrachtung ausgeblendet, da er für alle Varianten gleich ist.

Keinen nennenswerten Einfluss hat das Deckensystem auf den Energiebedarf des Gebäudes. Die wärmeübertragenden Bauteile der Gebäudehülle sind in allen Varianten hinsichtlich des Wärmedurchgangswiderstands identisch. Auch die Anlagentechnik und die Tageslichtverhältnisse unterscheiden sich bei den einzelnen Varianten nicht. Ein geringer Unterschied besteht lediglich bei den Innenbauteilen hinsichtlich der thermischen Speicherfähigkeit sowie beim Luftvolumen, welches sich aus unterschiedlichen lichten Geschosshöhen ergibt. Bei einer Berechnung des Endenergiebedarfs nach DIN V 18599 (für die Büronutzung) bzw. DIN V 4108-6 (für die Wohnnutzung) weichen die Varianten um weniger als ein Prozent voneinander ab [DAfStb (2010, S. 124)]. Der Betrieb des Gebäudes wird daher nicht in den Betrachtungsrahmen aufgenommen.

Der *zeitliche Betrachtungsrahmen* muss den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes umfassen, da verschiedene Deckensysteme sich nicht nur in der Herstellung, sondern auch in der Instandsetzung und im Rückbau sowie insbesondere im Umbau unterscheiden. Für jedes betrachtete Szenario kann ein anderer Betrachtungszeitraum erforderlich sein. Jedoch wird für ein gegebenes Szenario bei allen Varianten derselbe Betrachtungszeitraum angesetzt. Ist die Nutzungsdauer der Gebäudevarianten in einem Szenario unterschiedlich groß, so wird für das Gebäude mit der kürzeren Nutzungsdauer der Lebenszyklus des Folgegebäudes mit betrachtet.

Zur Wahl der passenden *Bezugsgröße* muss beachtet werden:

Mit der Konstruktionshöhe hat das Deckensystem einen Einfluss auf die Geschosshöhe. Da sich die Zahl der Geschosse aus der maximal zulässigen Gebäudehöhe laut Bebauungsplan und der Geschosshöhe ergibt, kann eine zu große Deckenhöhe gegebenenfalls zum Verlust eines Geschosses führen. Die Varianten würden sich dann hinsichtlich der zu Verfügung stehenden Bruttogeschossfläche unterscheiden. Legt man die Hochhausgrenze<sup>41</sup> zugrunde, so sind bei den hier vorliegenden Geschosshöhen zwischen 3,65 m und 3,15 m jeweils 6 Obergeschosse und damit dieselbe Bruttogeschossfläche möglich. Da sich außerdem die Konstruktionsflächen zwischen den Varianten kaum unterscheiden, kann auch von der gleichen Nutzfläche für alle Varianten ausgegangen werden.

Als Nutzungszeit im Gebäude steht die Zeit zwischen Übergabe und Stilllegung abzüglich der Änderungsphasen zur Verfügung. Im vorliegenden Fall wird unterstellt, dass der

---

<sup>41</sup> Hochhausgrenze: Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, über der Geländeoberfläche im Mittel nicht mehr als 22m nach MBO §2 (4)

Umbau der flexiblen Struktur und der Abriss und Neubau der herkömmlichen Struktur zum gleichen Ausfall an Nutzungszeit führen und bezogen auf die Gesamtnutzungsdauer vernachlässigbar sind.

Als Bezugsgröße wird aufgrund der vorangehend dargestellten Überlegungen die Bruttogeschossfläche mal Betrachtungszeitraum in der Einheit  $\text{m}^2_{\text{BGF}} \cdot \text{a}$  gewählt.

Bezüglich der **relevanten Nachhaltigkeitskriterien** können folgende Einflüsse festgestellt werden:

Die Varianten unterscheiden sich zunächst durch Art und Menge des verwendeten Materials. Dieses bestimmt die *Ökobilanz* infolge Herstellung, Instandsetzung und Entsorgung des Systems. Das Kriterium *Risiken für die lokale Umwelt* wird ausgeklammert, da sich die Varianten bei der vorliegenden Planungstiefe nicht unterscheiden. Es wird erst auf Ebene der Produktauswahl relevant (z.B. Anstriche mit oder ohne Lösungsmittel).

Die Kriterien zur Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen können auf die Betrachtung des *nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs* beschränkt werden. Das Kriterium zum *Gesamtprimärenergiebedarf* zielt vor allem auf die Anlagentechnik ab und ist für die Beurteilung der Deckenkonstruktionen nicht relevant.

Da der Betrieb des Gebäudes für alle Varianten jeweils gleich ist und daher außerhalb des Betrachtungsrahmens liegt, entfällt der *Frischwasserbedarf* als Kriterium. Alle Varianten sind außerdem hinsichtlich des Flächenbedarfs identisch, so dass das Kriterium *Flächeninanspruchnahme* ausgeklammert werden kann.

Ein augenfälliger Zusammenhang zu den verwendeten Deckenkonstruktionen ist bei den *Lebenszykluskosten* vorhanden, die daher als relevantes Kriterium gelten. Der Reinigungsaufwand ist hingegen bei allen Varianten aufgrund gleicher Oberflächengestaltung gleich groß und der Instandsetzungsaufwand wird explizit berücksichtigt, so dass das Kriterium *Reinigung und Instandsetzung* entfällt.

Die Kriterien zu Gesundheit und Risikovorsonge werden allesamt als Mindestanforderungen betrachtet und ohne expliziten Nachweis als erfüllt angesehen. Hinsichtlich *Innenraumbelastung*, *Erdbebenschutz* und *Hochwasserschutz* unterscheiden sich die Konstruktionsvarianten zudem nicht. Zwar haben die bauphysikalischen Eigenschaften der Deckensysteme einen Einfluss auf die Aspekte *Brandschutz* und *Schallschutz*, doch sind die Unterschiede gering, so dass sie nicht zu einer unterschiedlichen Einstufung im Rating führen würden.

Die Kriterien der *Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit* werden insgesamt ausgeklammert, da die Varianten bezüglich der Oberflächengestaltung, Ausstattung und Raumkonditionierung identisch sind.

Die Mindestanforderungen an *sichere, zumutbare Aufenthaltsräume* und die *funktionale Eignung* werden ohne formalen Nachweis als erfüllt betrachtet. Die Kriterien können ferner, ebenso wie die Kriterien *Barrierefreiheit* und *Architektonische und städtebauliche Qualität*, ausgeklammert werden, da sich die Varianten hinsichtlich der Grundrisse, Zugänge und Ausstattungsmerkmale nicht unterscheiden.

Das Kriterium *Denkmalschutz* ist ebenfalls nicht relevant, da unterstellt wird, dass für den Standort keine Auflagen bestehen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass aus dem Kriterienkatalog nur die Kriterien *Treibhauspotential*, *Ozonabbaupotential*, *Versauerungspotential*, *Überdüngungspotential*, *Bodennahe Ozonbildung* und *Primärenergiebedarf nicht erneuerbar*, sowie die *Lebenszykluskosten* in die Betrachtung einzubeziehen sind. Die Einhaltung der Mindestanforderungen ist für alle Varianten jeweils erfüllt.

### 6.5 Adaption der Multikriterienbewertung

Der Kriterienkatalog für die Untersuchung des Beispielgebäudes umfasst folgende Kriterien:

- Treibhauspotential (GWP)
- Ozonabbaupotential (ODP)
- Versauerungspotential (AP)
- Eutrophierungspotential (EP)
- Bodennahe Ozonbildung (POCP)
- nicht erneuerbare Primärenergie (PE n.e.)
- Lebenszykluskosten (LCC)

Die Indikatorwerte der Kriterien werden analog zu den Steckbriefen des Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) ermittelt, jedoch mit folgenden Anpassungen [BMVBS (209c)]:

Die Betrachtung wird auf die Kostengruppe 300 „Bauwerk – Baukonstruktion“ nach DIN 276-1 ohne die Kostengruppen 310 „Baugrube“, 370 „Baukonstruktive Einbauten“ und 390 „Sonstige Baukonstruktionen“ beschränkt. Als Datengrundlage für die Ökologie wird die Datenbank ÖkobaDat [BMVBS (2009b)] um neue betonspezifische Datensätze aus dem Forschungsprojekt „Nachhaltig Bauen mit Beton“ ergänzt<sup>42</sup>. Da es sich um ein hypothetisches Bauwerk handelt, können die Lebenszykluskosten nicht aus den

---

<sup>42</sup> vgl. hierzu DAfStb (2010, S. 46–51)

abgerechneten Kosten ermittelt werden. Sie werden stattdessen auf Basis der Datenbank zum Softwaretool „baulocc“ des Fachgebiets Massivbau der Technischen Universität Darmstadt [Herzog (2005)] kalkuliert. Außerdem wird mit einem realen Diskontsatz von 3,5% gerechnet, was allerdings dem nominalen Diskontsatz von 5,5% bei einer nominalen Preissteigerung für Bauleistungen von 2% entspricht.

Bei den betrachteten Kriterien handelt es sich um Kriterien mit negativer Wirkungsrichtung, die durch eine linear fallende Nutzwertfunktion beschrieben werden können. Je kleiner der Indikatorwert ist, umso besser ist die Zielerfüllung.

Ziel- und Grenzwert der Funktion werden in Anlehnung an das BNB-System festgelegt, jedoch können die dort festgelegten Werte nicht direkt übernommen werden, da die dortigen Randbedingungen nicht mit Betrachtungsrahmen und Betrachtungszeitraum der hier untersuchten Varianten übereinstimmen.

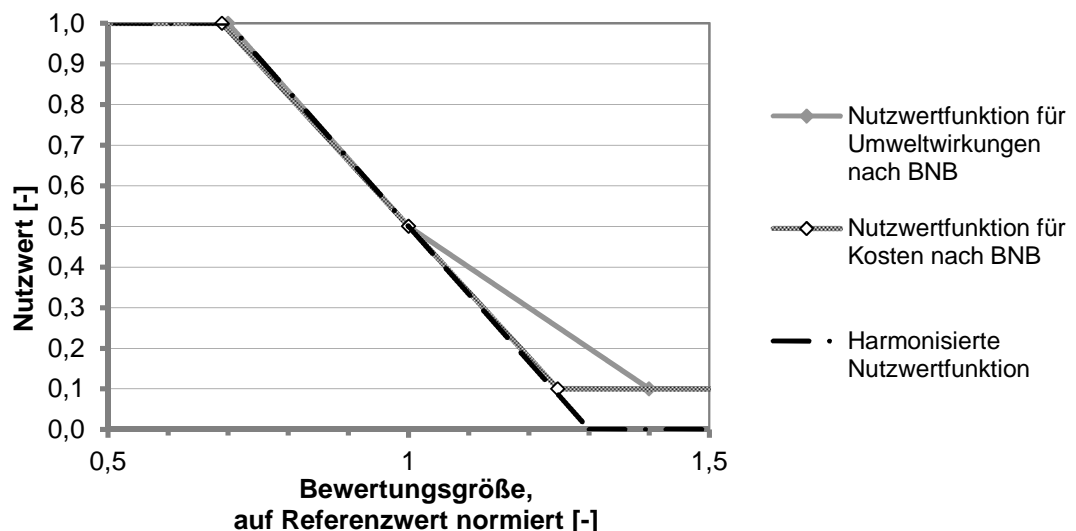


Abbildung 6-4: Nutzwertfunktionen für das Beispielgebäude [eigene Darstellung nach BMVBS (2009c, S.1.1.1/1ff) und BMVBS (2009c, S.2.1.1/1ff)]

Da es mangels Erfahrungsschatz zumeist schwierig ist, einen Betrag für Ziel- und Grenzwert anzugeben, bedient man sich im BNB-System hilfsweise des sogenannten Referenzwerts. Der Referenzwert entspricht einem Nutzen von 0,5 und soll den durchschnittlichen heutigen Baustandard darstellen. Ein Gebäude herkömmlicher Bauart dient als Repräsentant des heutigen Baustandards und legt die Höhe des Referenzwerts fest. Ziel- und Grenzwert werden dann aus dem Referenzwert abgeleitet. Für den vorliegenden Verfahrensvorschlag wird der Zielwert in Anlehnung an das BNB-System<sup>43</sup>

<sup>43</sup> Im BNB-System gelten unterschiedliche Nutzwertfunktionen für Ökobilanzkriterien und Lebenszykluskosten, die zudem lediglich abschnittsweise linear sind. Für den vorliegenden Verfahrensvorschlag wurden diese Funktionen vereinheitlicht.

auf den 0,7-fachen Referenzwert festgelegt, der Grenzwert auf den 1,3-fachen Referenzwert. Ergebnis ist die in Abbildung 6-4 und Gl. 6-1 dargestellte auf dem Einheitsintervall linear fallende Nutzwertfunktion  $u$ .

$$u(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \leq 0,7 \cdot R \\ 1 - \frac{x - 0,7 \cdot R}{0,6 \cdot R} & \text{für } 0,7 \cdot R < x \leq 1,3 \cdot R \\ 0 & \text{für } x > 1,3 \cdot R \end{cases} \quad \text{Gl. 6-1}$$

mit  $R$  Referenzwert für das Kriterium  
 $x$  Bewertungsgröße für das Kriterium  
 $u$  Nutzwert

Die Höhe der Referenzwerte wurde für das vorliegende Beispiel anhand des Gebäudes mit Zellenbürogrundriss in herkömmlicher Bauweise mit einer Nutzungsdauer von 50 Jahren festgelegt (vgl. Abschnitt 6.7). Die auf die Bezugsgröße normierten Referenzwerte sind in Tabelle 6-5 zusammengefasst.

Tabelle 6-5: Referenzwerte

Kriterium	Einheit	Referenzwert
Treibhauspotential (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -Äq./ m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> a	6,87
Ozonabbaupotential (ODP)	kg R11-Äq./ m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> a	2,38·10 <sup>-07</sup>
Versauerungspotential (AP)	kg SO <sub>2</sub> -Äq./ m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> a	2,76·10 <sup>-03</sup>
Eutrophierungspotential (EP)	kg PO <sub>4</sub> -Äq./ m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> a	3,03·10 <sup>-03</sup>
Bodennahe Ozonbildung (POCP)	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq./ m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> a	2,02·10 <sup>-03</sup>
nicht erneuerbare Primärenergie (PE n.e.)	kWh/ m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> a	81,0
Lebenszykluskosten (LCC)	€/ m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> a	30,0

Die ausgewählten Kriterien werden in die Hauptgruppen Ökologie und Ökonomie gegliedert. Diese beiden Gruppen erhalten gleiches Gewicht, da kein Vorrang der einen gegenüber der anderen besteht. Die Hauptgruppe Ökonomie wird durch nur ein Kriterium repräsentiert. Die Gruppe Ökologie enthält sechs Kriterien, die entsprechend ihrem Bedeutungsfaktor im BNB-System eingestuft werden. Danach sind Treibhauspotential und Primärenergiebedarf (nicht erneuerbar) gleich bedeutend und jeweils etwas wichtiger als die übrigen Kriterien. Ozonabbaupotential, Versauerungspotential, Eutrophierungspotential und Bodennahe Ozonbildung werden ebenfalls als jeweils gleich bedeutend eingestuft. Die resultierenden Gewichte sind in Tabelle 6-6 dargestellt.

Tabelle 6-6: Wichtungsfaktoren für die Nutzwertanalyse

Hauptgruppe	Kriterium	Gewicht		
Ökologie	Treibhauspotential (GWP)	15%	50%	100%
	Ozonabbaupotential (ODP)	5%		
	Versauerungspotential (AP)	5%		
	Eutrophierungspotential (EP)	5%		
	Bodennahe Ozonbildung (POCP)	5%		
	nicht erneuerbare Primärenergie (PE n.e.)	15%		
Ökonomie	Lebenszykluskosten (LCC)	50%	50%	

## 6.6 Ausarbeiten der Szenarien

### 6.6.1 Umfeldanalyse

Ziel der Szenarienausarbeitung ist es, verschiedene plausible Lebenswege des Gebäudes zu entwickeln, die sich für die Zukunft ergeben können. Mit Blick auf die Lebenszyklusbewertung der Adaptivität ist vor allem von Interesse, ob und wann Instandsetzungs- und Änderungsprozesse auftreten werden. Das Umfeld hierfür und seine zukünftige Entwicklung werden im Folgenden analysiert.

Die **planmäßige Instandsetzung** der Bauteile richtet sich nach den durchschnittlichen Lebensdauern. In Tabelle 6-7 ist der planmäßige Instandsetzungsturnus der einzelnen Bauteilkomponenten zusammengefasst [nach BBSR (2009)]. Die Instandsetzung des Estrichs und der Calciumsulfatplatten bzw. Betonplatten als Abdeckung für den Hohlraumboden ist dabei vom Austausch des Bodenbelags abhängig. Lässt sich dieser schlecht lösen, so wird der (Trocken-)Estrich beschädigt und muss ausgebessert oder gar erneuert werden. Wie sich die Situation im Einzelfall darstellt ist unter anderem von der Art der Verklebung und dem Alter des Estrichs abhängig. Für die Untersuchung wird unterstellt, dass der Teppich punktuell verklebt wird und beim Ablösen nur kleine Beschädigungen des Estrichs entstehen, während die Bodenbeläge Parkett, Fliesen und Naturstein aufgrund vollflächiger Verklebung beim Ablösen größere Beschädigungen zur Folge haben. Des Weiteren wird unterstellt, dass bei der 6 cm starken Zementestrich-Schicht von Decke Typ 1a und 1b sowie bei der 6 cm starken Betonplatte von Decke Typ 2 auch größere Beschädigungen zumindest einmal ausgebessert werden. Für Decke Typ 3 wird bei der 4 cm starken Calciumsulfatplatte davon ausgegangen, dass diese bei größeren Beschädigungen erneuert wird.



## 6 Anwendung der entwickelten Methodik an einem Beispielgebäude

Tabelle 6-7: Planmäßiger Instandsetzungsturnus einzelner Bauteilkomponenten  
[Werte nach BBSR (2009)]

Bauteilkomponente	planmäßiger Instandsetzungsturnus [Jahre]
hinterlüftete Natursteinfassade <sup>a)</sup>	40
Wärmedämmverbundsystem	30
Fenster (Isolierglas)	30
begrüntes Flachdach <sup>a)</sup>	30
Perimeterdämmung <sup>b)</sup>	-
Dämmung der Kellerdecke <sup>c)</sup>	30
schwimmender Estrich inkl. Trittschalldämmung <sup>d)</sup>	80
Abdeckung Hohlraumboden <sup>d)</sup>	70
Bodenfliesen	50
Teppich	10
Parkett	50
Naturstein-Bodenbelag	80
abgehängte Gipskartondecke	50
Innenanstrich (alle Oberflächen)	20
Innenputz auf Wänden	50
Wandfliesen	50
Trockenbauwände aus Gipskarton	50
Innentüren (pauschal)	60
<sup>a)</sup> maßgebend ist die Lebenserwartung der Wärmedämmung <sup>b)</sup> wird nicht ausgetauscht <sup>c)</sup> keine Angabe vorhanden, Annahme <sup>d)</sup> verkürzt sich bei mehrmaligem Austausch des Bodenbelags	

Bezüglich der **unplanmäßigen Instandsetzung** von Bauteilen können unvorhergesehene Schadensfälle bei der Szenarienentwicklung außer Acht gelassen werden, da die Untersuchung auf die Flexibilität des Deckensystems, nicht jedoch auf seine Robustheit abzielt.

Eine Erneuerung von Wand- und Bodenbelägen aus ästhetischen Gründen wird als plausible Vereinfachung nur bei einem Mieterwechsel bzw. Nutzerwechsel in Betracht gezogen. In den Szenarien des Beispielgebäudes ist daher die Mietdauer als externe Größe zu berücksichtigen. Im Jahr 2002 lag die Fluktuationsrate bei Mietwohnungen, also

der Anteil der umziehenden Mieterhaushalte an allen Mieterhaushalten nach Hammonia (2004, S. 34) im Bundesdurchschnitt bei knapp über 10 % bei sinkender Tendenz. Für die Szenarienbildung wird angenommen, dass dieses Niveau einer durchschnittlichen Mietdauer von 10 Jahren im Wohnungsbau in Zukunft stabil bleibt. Im Bürobereich werden verschiedene Nutzungsdauern in der Szenarienbildung berücksichtigt.

Ob der neue Nutzer tatsächlich eine Änderung der Wand- und Bodenbeläge wünscht, hängt zudem von seiner allgemeinen Werteorientierung ab. Das Alte kann vom Betrachter als wertvoll und erhaltenswert angesehen werden, bei dem Patina und Gebrauchsspuren zum Charme des Gebäudes beitragen, oder im Gegenteil als wertmindernd und ungepflegt. In der vorliegenden Untersuchung werden zwei Extreme für die Zukunft möglicher Wertorientierung berücksichtigt – zum einen die Wegwerfgesellschaft, in der das Alte häufig durch das Neue ersetzt wird, zum anderen die an Subsistenz orientierte Gesellschaft, die dem Leitbild der Entmaterialisierung folgt und sich mit dem Notwendigen begnügt.

Inwiefern während des Lebenszyklus **Änderungen** notwendig werden, hängt zunächst von der Entwicklung der Nachfrage ab. Ob im konkreten Fall tatsächlich eine Änderung vorgenommen wird, hängt jedoch von weiteren Einflussgrößen ab. Es handelt sich um eine Entscheidung, die vom Eigentümer zu treffen ist und damit nicht nur von objektiven und gebäudebezogenen Umständen abhängt. Beim Entscheider kann es sich um einen selbstnutzenden Eigentümer, privat oder in öffentlicher Hand, oder einen Investor handeln. In jedem Fall wird der Akteur seine Entscheidung nach Abwägung von Umsetzungsaufwand und Erfolgsaussichten unter Berücksichtigung der eigenen Finanzsituation und Risikobereitschaft treffen. Ihm steht dabei als zusätzliche Handlungsoption die Veräußerung der Immobilie offen, was die Entscheidung aus Gebäudesicht jedoch nur auf den neuen Eigentümer verlagert. Diese letztgenannten Einflussgrößen sind nicht gebäude- sondern akteursbezogen und für die Bewertung der Flexibilität nicht ausschlaggebend. Sie werden daher nicht weiter differenziert. Stattdessen wird für die Entwicklung der Szenarien unterstellt, dass eine Änderung stets dann durchgeführt wird, wenn sich die entsprechende Nachfrage nach Wohnungen, Büroflächen oder anderen Nutzungsformen ändert. Zusätzlich wird als Trendbruch der Fall betrachtet, dass ein äußeres Ereignis eine andersartige Nutzung des Grundstücks erzwingt, z.B. weil das Gebäude einer Umgehungsstraße weichen muss.

Im folgenden Abschnitt wird erkundet, wie sich die zukünftige Nachfrage nach unterschiedlichen Nutzungen für das Beispielgebäude entwickeln kann. Einen Überblick bietet hierzu Abbildung 6-5, in der die Einflussfaktoren auf verschiedene Nachfragearten dargestellt sind.

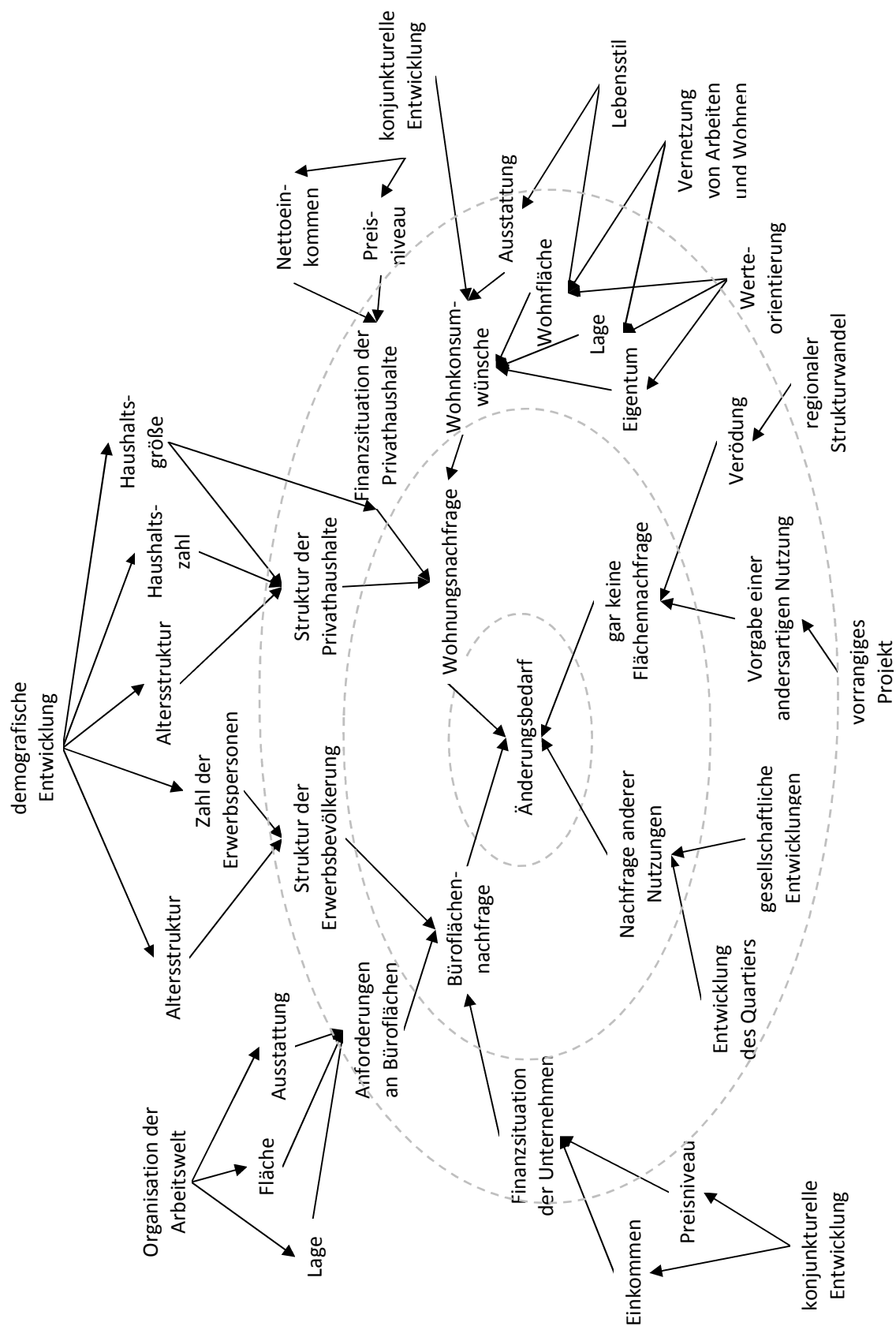


Abbildung 6-5: Einflussfaktoren auf verschiedene Nachfragearten am Beispielgebäude

Für das Beispielgebäude werden als Nachfragearten unterschieden:

- Nachfrage nach Wohnungen
- Nachfrage nach Büroflächen
- Nachfrage nach Gebäudefläche für andere Nutzungen
- keine Nachfrage nach Gebäudefläche

Die Entwicklung der Wohnungsnachfrage hängt von der demografischen Entwicklung ab und ist zudem stark standortabhängig. In den letzten Jahren nahm in Deutschland die Haushaltgröße, also die Zahl der Personen in einem Haushalt, stark ab, wie in Abbildung 6-6 dargestellt ist. Während die Zahl der Ein- und Zweipersonenhaushalte zunahm, ging die Zahl der größeren Haushalte kontinuierlich zurück [Statistisches Bundesamt (2009b, S. 76)]. Nach *Birg* (2000, S. 63) wird für die Zahl der Einpersonenhaushalte bis zum Jahr 2030 ein weiterer Anstieg prognostiziert. Danach wird deren Zahl wieder abnehmen und bis zum Jahr 2050 unter heutiges Niveau fallen. Trotz kontinuierlichen Bevölkerungsrückgangs sehen sowohl *Birg* (2000, S. 63) als auch die *Schader-Stiftung* (o.J.) auch für die Gesamtzahl der Haushalte in Deutschland bis 2015 zunächst einen leichten bis deutlichen Anstieg. Zwischen 2020 und 2030 wird die Zahl der Haushalte in etwa stabil bleiben, danach flacht sie merklich ab.

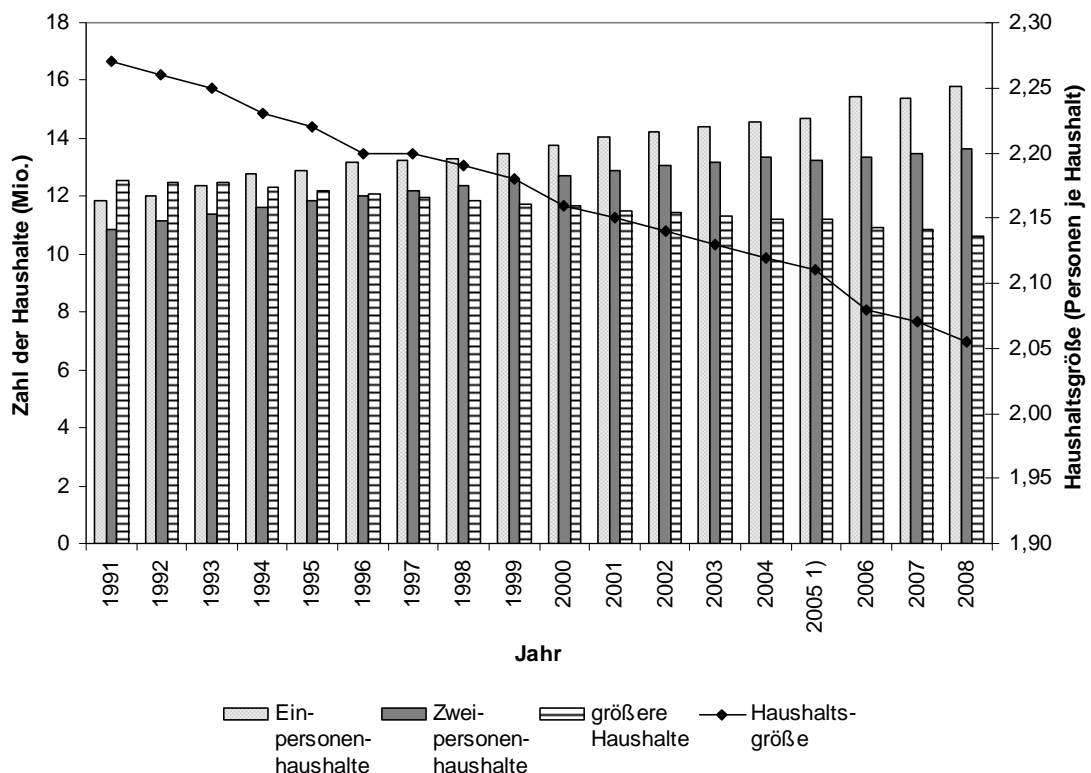


Abbildung 6-6: Entwicklung der Haushaltsgröße und der Zahl der Haushalte in Deutschland von 1991 bis 2008 [eigene Darstellung nach Statistischem Bundesamt (2009b, S. 76)]

Die Zahl der nachgefragten Wohnungen dürfte also nach 2020 nicht mehr zunehmen, woraus sich jedoch nicht direkt auf die insgesamt nachgefragte Wohnungsfläche schließen lässt, da größere Wohnungen eine abnehmende Wohnungszahl teilweise kompensieren können. Hierzu wird bei der *Schader-Stiftung* (o. J.) ausgeführt: „Könnte direkt von der Größe eines Haushalts auf die Größe seiner Wohnung geschlossen werden, müssten in Zukunft vermehrt kleine Wohnungen auf dem Markt gefragt sein. Hier müssen zwei Einschränkungen gemacht werden: erstens steigen die Wohnflächenansprüche jeder Haushaltsform im Zuge wachsenden Wohlstands an – und dieser Zusammenhang wird wohl auch in Zukunft Geltung haben. Zweitens muss die bereits in ihren Wohnungen lebende Bevölkerung berücksichtigt werden, die ihre Wohnungsgröße zumeist nicht an Veränderungen der Zahl der Haushaltsmitglieder anpasst (Remanenzeffekt). So kommt es, dass ältere Ein- und Zweipersonenhaushalte zu einem erheblichen Anteil in Wohnungen wohnen, die [...] für sie zu groß geworden sind. Die Haushaltsprognosen lassen lediglich den Schluss zu, dass in Zukunft vermehrt Wohnungen für kleinere Haushalte nachgefragt werden. Ob und in welchem Umfang diese dann auch kleiner sein werden, hängt von den Wohnkonsumwünschen der Haushalte ab und ihre Realisierung wiederum von deren Nettoeinkommen und vom Preisniveau des Wohnraums.“ Die konjunkturelle Entwicklung hat über die Finanzsituation also ebenfalls einen Einfluss auf die Wohnungsnachfrage. Neben der Zahl und Größe der nachgefragten Wohnungen ist auch die Frage zu stellen, ob sich die Nachfrage hinsichtlich Ausstattung und Lage ändern wird. Hierüber entscheiden Werteorientierung und Lebensstil jedes einzelnen. Für das Beispielgebäude werden daher Szenarien unterschieden, in denen die Attraktivität des innerstädtischen Quartiers die Nachfrage nach Wohnungen steigen oder fallen lässt. Schließlich bleibt noch zu klären, wie der Einfluss der Altersstruktur der Gesellschaft sich auf die Nachfrage nach bestimmten Wohnungstypen auswirken wird. Nach aktuellen Prognosen des *Statistischen Bundesamts* (2009a, S. 16) wird der Anteil der Älteren (65 bis unter 80 Jahre) und vor allem der Hochbetagten (80 Jahre und älter) bis 2060 stark zunehmen. Die häufigste Wohnform im Alter ist das Wohnen in einer ganz normalen Wohnung (90%) und nicht, wie landläufig häufig vermutet wird, in Heimen (4%), betreutem Wohnen (2%) oder anderen Wohnformen [Schader-Stiftung (o. J.)]. Zwar ziehen ältere Menschen seltener um als jüngere, jedoch wird die Umzugsbereitschaft Älterer unterschätzt [Heinze et al. (1997, S. 2)]. Auch wenn der Wunsch nach einer altersgerechten Wohnung wichtige Motivation für einen Umzug ist, so müssen die Wohnungen nicht allen Anforderungen nach DIN 18025-2 an Barrierefreiheit genügen, um als altersgerecht empfunden zu werden [ebd. S. 3-4]. Auch die durchgeführten Maßnahmen zur Wohnungsanpassung im Alter sind weniger umfangreich, als man vermuten könnte. Nur ein Drittel machen bauliche Maßnahmen aus, der Rest fällt auf eine Veränderung der Ausstattung oder den Einsatz von Hilfsmitteln. Von den baulichen Maßnahmen betreffen die meisten die Erreichbarkeit der Wohnung und den

Umbau/Einbau von Dusche/Badewanne im Sanitärbereich. Türverbreiterungen oder der Umbau von Zimmern betreffen nur rund 10% der Maßnahmen. Lediglich in 6% der Fälle wird die gesamte Wohnung rollstuhlgerecht gestaltet [Niepel (1995, S. 83–86), zitiert nach Schader-Stiftung (o. J.)]. Projiziert man die heutigen Verhältnisse auf die Zukunft, so kann für das Beispielgebäude folgendes Szenario abgeleitet werden. Der Wohngrundriss mit einzelnen Apartments unterschiedlicher Größe, vier kleineren und zwei größeren, ist auch für die Wohnnachfrage der Zukunft grundsätzlich geeignet. Als innerstädtisches Apartmentgebäude ist das Beispielgebäude eher zur Vermietung als für Eigentumswohnungen konzipiert. Unter der Annahme, dass die Mobilität in Zukunft nicht geringer sein wird als heute, werden sich Bedarfsänderungen eines Mieters (z.B. infolge Familiensituation, Alter etc.) auch künftig eher im Umzug des Mieters als in einem Umbau des Beispielgebäudes niederschlagen.

Die Nachfrage nach Büroflächen wird durch die Struktur der Erwerbsbevölkerung, die Finanzsituation der Unternehmen und die Organisation der Arbeitswelt beeinflusst. Nach dem *Statistischen Bundesamt* (2009a, S. 17–19) kommt es bis 2020 kaum zu Veränderungen hinsichtlich der Größe des Erwerbstätigenpotenzials, danach jedoch zu einem starken Rückgang. Dabei wird der Anteil der älteren Erwerbspersonen im Vergleich zu den jüngeren ansteigen. Eine Möglichkeit für Unternehmen, auf diese Herausforderung zu reagieren, besteht in einer Veränderung der Arbeitsorganisation. Flexiblere Formen der räumlichen und zeitlichen Organisation von Arbeit aber auch Arbeitsformen, die den Beschäftigten eine bessere Vereinbarkeit von Beruf und Privatleben bieten, führen zu einer stärkeren Vernetzung von Wohnen und Arbeiten. So führt z.B. der verstärkte Einsatz von Telearbeit nach *Gareis* (2002) dazu, dass die Nachfrage nach klassischen Zellenbüros schwindet. Gefragt sind Kommunikationsräume, in deren „Arbeitslandschaften“ ganzheitliche Kommunikation stattfindet. Am Beispielgebäude wird diese Entwicklung durch die Verwendung zweier unterschiedlicher Grundrisse abgebildet. Stärker als im Wohnungsbau werden im Bürobereich die Grundrisse an die Entwicklung der Arbeitswelt und der Büroorganisation angepasst. Am Beispielgebäude wird auf eine Nachfrageänderung daher durch Umbau reagiert.

Im Streben nach Kostenreduzierung wird die Bürofläche der Unternehmen verringert mit der Gefahr weiterer Leerstände, besonders in unattraktiven Lagen. Am Beispiel des Standorts Frankfurt analysiert *Groß* (2009, S. 119) die Zusammenhänge: „Die Lebensdauer einer Immobilie hängt maßgeblich von urbanen und gestalterischen Qualitäten ab. [...] Rein auf Großstrukturen ausgelegte Bürogebäude auf der grünen Wiese wie beispielsweise im Frankfurter Mertonviertel lassen eine lange Lebensdauer der dort errichteten Immobilien fraglich erscheinen. Durch die Konversion von Bahn- und Postflächen in den Innenstädten sind in einer gewachsenen, infrastrukturell bestens erschlossenen Struktur neue Flächenangebote entstanden, die zu einem Rückzug der

Nutzer in die Stadt führen. Für vergleichsweise unattraktive Standorte in Randlagen, führt dies zu erheblichem Leerstand insbesondere dann, wenn die dort errichteten Strukturen nicht flexibel auch auf kleinere Mieteinheiten angepasst werden können. Ein Abriss solcher auf lediglich einen Großmieter ausgelegten Immobilien am falschen Standort bereits nach 20-30 Jahren wird die Folge sein.“ Für die Szenarienentwicklung des Beispielgebäudes wird eine derartige Entwicklung als Trendbruchszenario berücksichtigt.

Bei der Entwicklung der Bevölkerung herrschen starke regionale Disparitäten. *Kordey & Korte* (2005, S. 11) konstatieren hierzu: „Die beschriebene demographische Entwicklung wird sich in unterschiedlich geprägten Regionen ganz verschieden auswirken. Schon heute variieren die Bevölkerungsdichte und der Altersaufbau der Bevölkerung zwischen den Regionen erheblich. Insbesondere in den Neuen Bundesländern gibt es schon heute stark entleerte Gebiete, aus denen vor allem junge Menschen mangels Arbeits- und Ausbildungsplätzen abgewandert sind. [...] Einer immer größer werdenden Gruppe von Kreisen mit Schrumpfungstendenzen steht eine kleiner werdende Gruppe mit teils noch kräftigem Wachstum gegenüber.“ Für die Szenarien des Beispielgebäudes werden daher unterschiedliche regionale Entwicklungen unterschieden.

Aus dem städtischen Wandel ergibt sich auch die Nachfrage nach anderen Nutzungen für das Beispielgebäude. Für attraktive Standorte bietet sich bei einem Rückgang der Nachfrage nach Büroflächen eine Wohnnutzung und Mischnutzungen an. Nach *Gareis* (2002) wird die „Nachfrage nach hochzentralen Wohnstandorten [...] auch in Zukunft angesichts des weitverbreiteten Interesses an einem urbanen Lebensstil [...] eher zu- als abnehmen“. Infrage kommen für Nutzungen in der Stadt verschiedene gewerbliche Nutzungen, neben Einzelhandel und Gastronomie z.B. alle Dienstleistungen rund um das Wohnen, kulturelle Angebote und Freizeitbeschäftigungen. Aufgrund der Vielfalt der Möglichkeiten wird hier für die Szenarien des Beispielgebäudes nicht weiter differenziert. Es wird stattdessen generell die Umnutzung zu einer anderen Nutzungsart in Betracht gezogen.

### 6.6.2 Deskriptoren

Aus den oben genannten Überlegungen lassen sich kritische Deskriptoren für den Lebensweg des Beispielgebäudes ableiten, für die jeweils verschiedene Annahmen plausibel sind (vgl. Tabelle 6-8). Zunächst ist hier die *Organisation der Arbeitswelt* zu nennen. Wandelt sie sich stark, so führt dies immer wieder zu neuen Grundrissanforderungen im Bürobau. In der Annahme „fortwährender Wandel der Arbeitswelt“ werden die Grundrisse nach jeweils zwanzig Jahren verändert. Bei der gegensätzlichen Annahme „kein Wandel der Arbeitswelt“ erfolgt auch langfristig kein Umbau. Ein weiterer Deskriptor ist die *Vermischung von Arbeiten, Wohnen und anderen Nutzungen im Quartier*. Hier werden die Annahmen „reine Büronutzung“ und „Mischung von Büros

und Wohnen“ untersucht. Bezüglich des Deskriptors *Lebensstil* wird zum einen eine „Zunahme des urbanen Lebensstils“ unterstellt, die die Innenstadt als Standort für andere Nutzungen attraktiv macht, zum anderen eine „Abnahme des urbanen Lebensstils“ mit gegenteiligem Effekt. Bezüglich der *Werteorientierung* wird zwischen den gegenteiligen Annahmen „Wegwerfgesellschaft“ und „Entmaterialisierung“ unterschieden. Im ersten Fall werden Oberflächen häufig erneuert, im zweiten Fall wird die technische Lebensdauer der Bauprodukte ausgereizt. Schließlich wird für den Standort des Beispielgebäudes der *regionale Strukturwandel* berücksichtigt. Im einen Fall profitiert das Quartier von Zuzug, im anderen Fall kommt es zu vermehrter Abwanderung, die schließlich zur Verödung des Quartiers führt. Schließlich wird noch als Trendbruch der Fall unterstellt, dass das Gelände des Beispielgebäudes anderweitig benötigt wird und daher keine weitere Nutzung für ein Gebäude möglich ist. Hieraus werden die Szenarien abgeleitet, die nachfolgend beschrieben werden.

Tabelle 6-8: Deskriptoren und deren Ausprägungen für das Beispielgebäude

Deskriptor	Ausprägungen	Verwendet in Szenario
Organisation der Arbeitswelt	fortwährender Wandel der Arbeitswelt	2, 3, 4, 6
	kein Wandel der Arbeitswelt	1
Nutzungsmischung im Quartier	reine Büronutzung	1, 2
	Mischung von Büros und Wohnen	3, 6
Lebensstil	Zunahme des urbanen Lebensstils	2, 3, 6
	Abnahme des urbanen Lebensstils	5
Werteorientierung	Wegwerfgesellschaft	2
	Entmaterialisierung	1, 3, 5
regionaler Strukturwandel	Zuzug	2, 3, 6
	Verödung	5
Trendbruch	Gelände anderweitig benötigt	4

### 6.6.3 Szenarien

Als Startpunkt gilt für alle Szenarien die folgende Ausgangssituation: Das Quartier des Beispielgebäudes liegt im Zentrum oder in Zentrumsnähe einer mittleren bis größeren Stadt. Zurzeit werden dort vor allem Büroflächen nachgefragt. Auf einem freigewordenen Grundstück einer geschlossenen Häuserzeile wird daher ein sechsstöckiges Bürogebäude



mit zwei Untergeschossen als Tiefgarage erstellt. Die Gestaltung der Grundrisse orientiert sich am klassischen Zellenbüro. Ab hier gestalten sich die Szenarien verschieden.

### Szenario 0: Referenz

Das Referenz-Szenario wird nicht aus den Überlegungen zur künftigen Entwicklung der Deskriptoren abgeleitet. Es ergibt sich in Anlehnung an die Berechnungsvorschriften der Zertifizierung nach dem BNB-System. Die Gesamtnutzungsdauer beträgt 50 Jahre, es erfolgen keine Umnutzungen oder Umbauten. Die Instandsetzung richtet sich nach den durchschnittlichen Lebensdauern der Komponenten. Das Referenz-Szenario dient vorrangig zur Festlegung des Referenzwerts. Daneben wird es als denkbare Szenario in die Auswertung mit einbezogen.

### Szenario 1: Langfristig gleichbleibende Nutzung

Das erste Szenario bildet einen Lebensverlauf mit langfristig gleichbleibender Nutzung ab. Beim Gebäudenutzer handelt es sich zum Beispiel um eine Behörde, deren Arbeitswelt langfristig keinen wesentlichen Veränderungen unterworfen ist. Größere Umbauten werden nicht vorgenommen. Die eingesetzten Materialien werden möglichst lange genutzt, teils aus wirtschaftlicher Notwendigkeit und weil keine gehobenen Ansprüche an die Ästhetik gestellt werden, teils um eine Vorbildrolle hinsichtlich Nachhaltigkeit zu spielen. Das Wanderungssaldo infolge regionalen Strukturwandels ist nahe Null und es findet keine weitere Urbanisierung des Standorts statt. Seine Attraktivität ändert sich kaum, so dass kein Druck entsteht, die Flächen für andere lukrativere Nutzungen freizumachen. Die Nutzung bleibt über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes von 100 Jahren dieselbe bei unverändertem Grundriss. Instandsetzungen von Bauteilkomponenten finden erst bei Erreichen der Lebensdauer des Materials statt. Das Szenario stellt einen Fall mit extrem langen Nutzungsdauern ohne Umbauten dar.

### Szenario 2: Steter Wandel der Arbeitswelt

Im zweiten Szenario wird das Beispielgebäude ebenfalls über 100 Jahre als Bürogebäude genutzt, jedoch von Unternehmen, deren Arbeitswelt einem steten Wandel unterworfen ist. Während der ursprüngliche Ausbau zunächst den Anforderungen voll genügt, zeichnet sich ab, dass diese sich in einem Turnus von etwa 20 Jahren grundlegend ändern. Das Quartier profitiert von Zuwanderungen bei gemäßigter Urbanisierung des Lebensstils. So bleibt die Nachfrage nach Büroflächen am Standort unvermindert, obwohl allgemein die Büroflächennachfrage aufgrund der demografischen Entwicklung in Zusammenhang mit einer Veränderung der Arbeitsorganisation sinkt. Voraussetzung für eine gute Mietauslastung des Gebäudes ist jedoch eine geeignete, moderne Ausstattung. Der Gebäudebesitzer reagiert hierauf mit dem regelmäßigen Umbau des Gebäudes, der jeweils eine Grundrissänderung und vollständige Neuerung des Ausbaus umfasst. Dabei wird auf eine mögliche Wiederverwendung von z.B. Türen oder den Erhalt von z.B. Bodenbelägen

in einer Wegwerfgesellschaft mit hohen Ansprüchen an die Repräsentativität der Büroräume nicht geachtet. Das Beispielgebäude wird zunächst 20 Jahre mit dem Grundriss „Zellenbüro“ genutzt. Danach erfolgt ein Umbau zum Grundriss „Team-Center“. Der Wechsel der Grundrisse erfolgt weiter im Abstand von jeweils 20 Jahren, wobei für die Modellierung beispielhaft die beiden vorgenannten Grundrisse verwendet werden. Ob diese den bevorzugten Grundrissen in 40, 60 oder 80 Jahren tatsächlich entsprechen, ist für die Untersuchung der generellen Flexibilität des Beispielgebäudes nicht ausschlaggebend. Das Szenario stellt einen Fall mit häufigen Umbauten, jedoch ohne Umnutzungen dar.

#### Szenario 3: Urbanisierung des Quartiers

Im dritten Szenario erfordert die geänderte Organisation der Arbeitswelt ebenso wie im zweiten Szenario einen Umbau nach 20 Jahren zum Grundriss „Team Center“. Das Quartier profitiert vom Strukturwandel und einer deutlichen Zunahme der Urbanisierung. Mit dem Wandel der Arbeitsorganisation wird die strikte Trennung zwischen Wohnen und Arbeiten immer mehr aufgehoben. Das Arbeiten von zuhause und weitere Rationalisierungen lassen die Nachfrage nach Büroflächen sinken. Gleichzeitig wird aufgrund des guten Angebots an kulturellen Einrichtungen und wohnnahen Dienstleistungen das Quartier für das Wohnen immer beliebter. Der Gebäudebesitzer reagiert darauf, indem er das Gebäude nach 40 Jahren zu einem Apartmentgebäude umnutzt. Für die flexible Struktur bedeutet die Umnutzung von Büros zu Wohnen eine Änderung des gesamten Ausbaus. Die herkömmliche Struktur kann nicht wirtschaftlich sinnvoll zu einem Wohngebäude umgenutzt werden. Sie wird abgerissen und an ihrer Stelle entsteht ein Neubau. Der Nachhaltigkeitsgedanke setzt sich vor allem im privaten Bereich durch. So wird z.B. ein Jahrzehnte altes Parkett als stilvoll empfunden und trotz mehrfachen Mieterwechsels nicht vorzeitig ausgetauscht. Die Instandsetzungsarbeiten in der Wohnnutzung bleiben daher relativ gering. Das Szenario repräsentiert die Fälle, in denen eine Umnutzung des Beispielgebäudes erfolgt.

#### Szenario 4: Trendbruch

Das vierte Szenario basiert in seinen Grundannahmen auf dem zweiten und dritten Szenario. Auch hier erfordert die geänderte Organisation der Arbeitswelt nach 20 Jahren einen Umbau der Büroräume mit einer Grundrissänderung zum „Team Center“. Nach 40 Jahren jedoch kommt es zu einer unvorhergesehenen städtebaulichen Entwicklung. Das Grundstück des Beispielgebäudes wird für ein verkehrliches Großprojekt benötigt. Das bestehende Gebäude wird abgerissen, ohne dass an seiner Stelle ein Neubau entsteht. Das Szenario stellt einen Fall mit unbeabsichtigt kurzer Nutzungsdauer dar.

### Szenario 5: Verödetes Quartier

Im fünften Szenario zählt das Quartier des Beispielgebäudes zu den Verlierern im regionalen Strukturwandel. Die demografisch bedingte Abnahme der Erwerbsbevölkerung und die Abwanderung der jüngeren Generation aufs Land oder in die wenigen noch boomenden Innenstädte führen dazu, dass immer mehr Büroflächen leer stehen. Sie werden zunächst provisorisch z.B. als Künstlerateliers genutzt. Doch die Chancen für eine wirtschaftliche Nutzung der leerstehenden Flächen schwinden mit der zunehmenden Verödung des Quartiers. Diese Marktlage führt dazu, dass Investitionen zur Modernisierung des Bürogebäudes gescheut werden. Die Instandsetzung beschränkt sich auf das Notwendigste. Nach einer Phase des Abwartens, in der die Qualität der Nutzung stetig zurückgeht, wird das Gebäude nach einer Gesamtnutzungsdauer von nur 30 Jahren schließlich rückgebaut. An seiner Stelle entsteht kein Neubau, es bleibt eine Brachfläche zurück. Dieses Szenario bildet den Fall einer extrem kurzen Gesamtnutzungsdauer ab.

### Szenario 6: Unstete Standortentwicklung

Im sechsten Szenario ist der Standort während der Betrachtungsdauer von 100 Jahren einem ständigen Wandel unterworfen. Die Dynamik des Quartiers führt zu einem raschen Wechsel zwischen reinem Büroviertel, beliebter Wohngegend und bunt durchmischter Nutzung. Bereits nach 25 Jahren ändert sich aufgrund der demografischen Entwicklung und der Urbanisierung die Nachfrage derart, dass das Bürogebäude zu einem Apartmenthaus umgenutzt wird. Analog zum dritten Szenario kann dies für die flexible Struktur durch einen Umbau erreicht werden, während die herkömmliche Struktur einen Neubau erfordert. Das Quartier profitiert weiterhin von der ungebremsten Attraktivität des Standorts. Jedoch steigt die Nachfrage nach Nicht-Wohn-Nutzung im Laufe der Zeit so stark an, dass eine erneute Umnutzung sinnvoll wird. Nach weiteren 50 Jahren weicht daher die Wohnnutzung erneut einer anderen Nutzungsart, die von der flexiblen Struktur zwar zu leisten ist, vom herkömmlichen Gebäude jedoch nicht. Diese Nutzung wird in der Modellierung durch den Grundriss „Team-Center“ dargestellt. Dieser steht jedoch stellvertretend für viele andere denkbare Nutzungen. Das Szenario stellt damit den Fall mit den meisten Umnutzungen dar.

Die einzelnen Szenarien sind in Tabelle 6-9 zur Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 6-9: Zusammenfassung der Szenarien für das Beispielgebäude

Nr.	Name des Szenarios	Kurzbeschreibung	Abfolge der Grundrisse	Gesamtnutzungsdauer
0	Referenz	analog Zertifizierung	Zellenbüro	50 Jahre
1	Langfristig gleichbleibende Nutzung	lange Nutzungsdauern ohne Umbauten	Zellenbüro	100 Jahre
2	Steter Wandel der Arbeitswelt	häufige Umbauten jedoch ohne Umnutzungen	Zellenbüro Team-Center Zellenbüro Team-Center Zellenbüro	100 Jahre
3	Urbanisierung des Quartiers	ein Umbau und eine Umnutzung	Zellenbüro Team-Center Apartments	100 Jahre
4	Trendbruch	unbeabsichtigt kurze Nutzungsdauer	Zellenbüro Team-Center	40 Jahre
5	Verödetes Quartier	kurze Gesamtnutzungsdauer ohne Umbauten	Zellenbüro	30 Jahre
6	Unstete Standortentwicklung	häufige Umnutzung	Zellenbüro Apartments Team-Center	100 Jahre

## 6.7 Aufstellen der Entscheidungsmatrix

Zur Nachhaltigkeitsbewertung sind für jede Variante-Szenario-Kombination die Ökobilanz und die Lebenszykluskostenrechnung zu erstellen. Die drei Varianten des Beispielgebäudes besitzen zusammen 61 verschiedene Bauteile, die in sieben Szenarien zum Einsatz kommen. Diese Aufgabe ist aufgrund des Umfangs nur mit einem geeigneten Softwaretool sinnvoll durchführbar. In der vorliegenden Arbeit wurde die Software „bauloop“, eine Eigenentwicklung des Fachgebiets Massivbau, verwendet<sup>44</sup>. Die Software wurde für die Berechnungen um ein Modul zur Berücksichtigung verschiedener

<sup>44</sup> Die Entwicklung und Weiterentwicklung erfolgt seit dem Jahr 1999 im Rahmen von Forschungsvorhaben und Dissertationen am Fachgebiet Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Vgl. hierzu Hüske (2001), Herzog (2005) und Renner (2008). Die für diese Arbeit verwendete Version von „bauloop“ mit den Eingabe- und Ergebnisdaten des Beispielgebäudes ist dort hinterlegt.

Szenarien für jedes Bauteil angepasst. Außerdem wurde die Datenbasis im Bereich der Ökologie auf die Ökobau.dat 2008 [BMVBS (2009b)] mit Ergänzung aus dem Forschungsvorhaben Nachhaltig Bauen mit Beton [DAfStb (2010)] aktualisiert. Die Datenbasis im Bereich der ökonomischen Daten wurde über den Baupreisindex auf das Jahr 2009 angepasst und anhand von statistischen Baukostenkennwerten nach *BKI* (2009) auf Plausibilität überprüft. Fehlende Datensätze wurden nach *BKI* (2009) ergänzt.

Zunächst wurden in der Software die Bauteile mit ihrem jeweiligen Schichtaufbau eingegeben und die Schichten mit den passenden Materialien verknüpft. Für jedes Material ist in der Datenbank der zugehörige Ökobilanz- und Kostendatensatz hinterlegt. Danach wurde für jedes Bauteil der Lebenszyklus im jeweiligen Szenario definiert. Hierzu benötigt die Software Angaben über den Zeitpunkt des Einbaus, der Instandsetzung und des Ausbaus der einzelnen Schichten. Die Generierung der Lebenszyklen läuft über hinterlegte Nutzungsdauern halb automatisiert ab. In der anschließenden Berechnung wurde in der Software eine Ergebnisdatei generiert, die den resultierenden Stoffstrom, die zugehörigen Ökobilanzwerte und diskontierten Kosten enthält. Zur Auswertung der Ergebnisse stehen in der Software dann Filter, Abfragen und grafische Darstellungen zur Verfügung. Die aus der Software ermittelten jährlichen Werte für die Kriterien Treibhauspotential (GWP), Ozonabbaupotential (ODP), Versauerungspotential (AP), Eutrophierungspotential (EP), Bodennahe Ozonbildung (POCP), nicht erneuerbare Primärenergie (PE n.e.) und Lebenszykluskosten (LCC) konnten dann der Multikriterienbewertung zugeführt werden.

Tabelle 6-10 zeigt beispielhaft die Auswertung der Nutzwertanalyse für die drei Gebäudevarianten im Szenario 0 (Referenz). Sie enthält in Spalte 2 die Bewertungsgröße für jedes Kriterium, jeweils bezogen auf  $\text{m}^2_{\text{BGF}}$  und Jahr. In Spalte 3 wurde die Bewertungsgröße auf den Referenzwert bezogen. Per Definition erzielt hier die herkömmliche Struktur in jedem Kriterium den Wert 1, da die Referenzwerte (vgl. Tabelle 6-5) aus dem herkömmlichen Gebäude im Referenzszenario 0 abgeleitet wurden. Die flexible Tragstruktur mit Calciumsulfatplatten (a) liegt in den einzelnen Kriterien um +2% bis +15% über der herkömmlichen Struktur. Die flexible Struktur mit Betonplatten (b) liegt teilweise darunter (-3%), teilweise darüber (+7%). Durch Auswerten von Gl. 6-1 kann in Spalte 4 der Nutzen für jedes Kriterium angegeben werden. In Spalte 5 wurden die gewählten Wichtungsfaktoren für die Einzelkriterien aus Tabelle 6-6 eingetragen. Durch die Addition der gewichteten Einzelnutzen ergibt sich für Spalte 6 der Gesamtnutzen der Variante. Das heißt, alle Nachhaltigkeitskriterien werden nur noch durch eine einzige aggregierte Zahl, nämlich den (Gesamt-)Nutzen repräsentiert. Die herkömmliche Tragstruktur erzielt definitionsgemäß im Referenzszenario einen Nutzen von 0,5. Die flexiblen Varianten liegen leicht darunter.

Tabelle 6-10: Nutzwertanalyse für die Varianten im Szenario 0 (Referenz)

Kriterium	Bewertungs- größe	normiert auf Referenzwert [-]	Einzel- nutzen [-]	Gewich- tung	Gesamt- nutzen [-]
1	2	3	4	5	6
Herkömmliche Tragstruktur: Szenario 0					
GWP	6,87	1,00	0,50	15%	0,50
ODP	2,38E-07	1,00	0,50	5%	
AP	0,0276	1,00	0,50	5%	
EP	0,00303	1,00	0,50	5%	
POCP	0,00202	1,00	0,50	5%	
PE n.e.	81,0	1,00	0,50	15%	
LCC	30,0	1,00	0,50	50%	
Flexible Tragstruktur (a): Szenario 0					
GWP	7,41	1,08	0,37	15%	0,39
ODP	2,79E-07	1,17	0,22	5%	
AP	0,0280	1,02	0,47	5%	
EP	0,00309	1,02	0,47	5%	
POCP	0,00205	1,02	0,47	5%	
PE n.e.	93,5	1,15	0,24	15%	
LCC	31,2	1,04	0,43	50%	
Flexible Tragstruktur (b): Szenario 0					
GWP	6,70	0,97	0,54	15%	0,49
ODP	2,54E-07	1,07	0,39	5%	
AP	0,0273	0,99	0,52	5%	
EP	0,00296	0,98	0,54	5%	
POCP	0,00199	0,99	0,52	5%	
PE n.e.	80,3	0,99	0,51	15%	
LCC	30,7	1,02	0,46	50%	
Legende:					
GWP:	Treibhauspotential [kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
ODP:	Ozonabbaupotential [kg R <sub>11</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
AP:	Versauerungspotential [kg SO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
EP:	Eutrophierungspotential [kg PO <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
POCP:	Bodennahe Ozonbildung [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
PE n.e.:	nicht erneuerbare Primärenergie [MJ/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
LCC:	Lebenszykluskosten [€/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				

Die Nutzwertanalysen für die übrigen Szenarien sind in Anhang F dargestellt. Aus den jeweiligen Gesamtnutzenwerten ergibt sich dann die Entscheidungsmatrix für das Beispielgebäude nach Tabelle 6-11.

## 6.8 Analyse und Interpretation

### 6.8.1 Allgemeine Betrachtungen

Die oben dargestellte Multikriterienbewertung führt bei Auswertung jeder Variante in jedem Szenario zu einer 3x7-Matrix mit dem Gesamtnutzen als Entscheidungsgröße. Diese ist in Tabelle 6-11 dargestellt. Die im jeweiligen Szenario vorteilhafteste Variante ist grau hinterlegt. Zur Information und für die weitere Auswertung sind zusätzlich die jeweiligen Zeilenminima und -maxima sowie die Spaltenmaxima angegeben.

Tabelle 6-11: Entscheidungsmatrix für das Beispielgebäude ( $\epsilon < 0,01$ )

Szenario Nr. \ Variante	0	1	2	3	4	5	6	Min	Max
Herkömmliche Tragstruktur	0,50	0,80	0,63	0,59	0,38	0,17	0,33	0,17	0,80
Flexible Tragstruktur (a)	0,39	0,72	0,59	0,65	0,34	0,06	0,68	0,06	0,72
Flexible Tragstruktur (b)	0,49	0,80	0,68	0,72	0,37	0,11	0,75	0,11	0,80
Max	0,50	0,80	0,68	0,72	0,38	0,17	0,75		

Zunächst wird die Matrix auf ineffiziente Varianten hin untersucht. In Tabelle 6-11 ist zu erkennen, dass die Variante „Flexible Tragstruktur (a)“ durch die Variante „Flexible Tragstruktur (b)“ dominiert wird. Die erzielten Nutzwerte sind hier in jedem Szenario kleiner. Nur die herkömmliche Tragstruktur und die flexible Tragstruktur (b) stellen effiziente Varianten dar. In Szenario 0, 4 und 5 wird die herkömmliche Variante bevorzugt, in Szenario 2, 3 und 6 hingegen die flexible Variante (b). In Szenario 1 besteht zwischen beiden Varianten Indifferenz – bei Rundung des Ergebnisses auf zwei Nachkommastellen, was einer Indifferenzschranke für die Differenz  $\epsilon < 0,01$  entspricht. Es soll nun untersucht werden, ob eine schrittweise Erhöhung dieser Indifferenzschranke schließlich zu einer dominanten Lösung führt (erweitertes Indifferenzkriterium). Eine Erhöhung der Schranke auf  $\epsilon = 0,05$  führt dazu, dass in den Szenarien 0,1,2 und 4 Indifferenz zwischen beiden Varianten herrscht (vgl. Tabelle 6-12). In Szenario 3 und 6 wird weiterhin die flexible Tragstruktur bevorzugt, in Szenario 5 die herkömmliche. Eine geringfügige weitere Erhöhung der Schranke auf  $\epsilon = 0,06$  führt dazu, dass auch in Szenario 5 Indifferenz herrscht und die flexible Tragstruktur somit die herkömmliche Tragstruktur dominiert. Ist  $\epsilon$  hinreichend klein, so kann die dominante Variante als die favorisierte Lösung betrachtet werden. In Bezug auf Szenario 5 entspricht diese Schranke jedoch einem großen relativen Unterschied: Der Nutzen der flexiblen Tragstruktur ist um ein Drittel kleiner als der der herkömmlichen Tragstruktur. Das erweiterte Indifferenz-

kriterium sollte für das Beispielgebäude daher nicht alleine zur Entscheidung herangezogen werden.

Tabelle 6-12: Anwendung des erweiterten Indifferenzkriterium mit  $\varepsilon = 0,05$

Szenario Nr. \ Variante	0	1	2	3	4	5	6		
								Min	Max
Herkömmliche Tragstruktur	0,50	0,80	0,63	0,59	0,38	0,17	0,33	0,17	0,80
Flexible Tragstruktur (b)	0,49	0,80	0,68	0,72	0,37	0,11	0,75	0,11	0,80
Betrag der Differenz	0,01	0,00	0,05	0,13	0,01	0,06	0,42		

### 6.8.2 Anwendung von Entscheidungsregeln bei Ungewissheit

Zur weiteren Analyse der Entscheidungsmatrix werden die Entscheidungsregeln bei Ungewissheit angewendet, nämlich Maximin-Regel, Maximax-Regel, Hurwicz-Regel mit Optimismuskoeffizient  $\alpha=0,5$ , Savage-Niehans-Regel und Laplace-Regel. Zur Auswertung der Savage-Niehans-Regel wird die Entscheidungsmatrix des Nutzwerts zunächst in eine Regret-Matrix transformiert (Tabelle 6-13). Die Regret-Matrix enthält die Differenz zwischen dem erreichten Ergebnis und dem besten Ergebnis für das jeweilige Szenario. Sie repräsentiert das Bedauern bei Eintritt eines bestimmten Szenarios, nicht die vorteilhafteste Variante gewählt zu haben.

Tabelle 6-13: Regret-Matrix für das Beispielgebäude

Szenario Nr. \ Variante	0	1	2	3	4	5	6	
								Max
Herkömmliche Tragstruktur	0	0	0,05	0,13	0	0	0,42	0,42
Flexible Tragstruktur (a)	0,11	0,08	0,09	0,07	0,04	0,11	0,07	0,11
Flexible Tragstruktur (b)	0,01	0	0	0	0,01	0,06	0	0,06

In Tabelle 6-14 ist die Auswertung der Entscheidungsregeln bei Ungewissheit auf die Entscheidungsmatrix des Beispielgebäudes dargestellt. Die jeweils favorisierte Variante ist dunkel hinterlegt. Die ineffiziente Variante „Flexible Tragstruktur (a)“ wird in keinem Fall favorisiert, auf sie wird im Weiteren nicht mehr eingegangen werden.

Die Maximin-Regel entspricht einem pessimistischen Entscheider, der nach dem Prinzip der Schadensminimierung handelt. Dieser bevorzugt die herkömmliche Tragstruktur. Ein optimistischer Entscheider, der nach dem Prinzip der Gewinnmaximierung handelt, ist zwischen der herkömmlichen und der flexiblen Tragstruktur (b) indifferent. Die Hurwicz-



Regel, auch Optimismus-Pessimismus-Regel genannt, stellt einen Mittelweg zwischen den vorgenannten Prinzipien dar. Für das Beispielgebäude fällt eine Entscheidung nach dieser Regel immer zugunsten der herkömmlichen Tragstruktur aus. Die Tabelle enthält beispielhaft die Auswertung für einen Optimismuskoeffizienten von  $\alpha = 0,5$ . Möchte der Entscheider hingegen das Bedauern, die falsche Variante gewählt zu haben, minimieren, so entscheidet er sich nach der Savage-Niehans-Regel für die flexible Tragstruktur. Auch nach der Laplace-Regel fiel seine Entscheidung auf die flexible Variante. Der Laplace-Regel liegt das Prinzip zugrunde, die Summe des Nutzens über alle Szenarien zu maximieren. Dahinter liegt die Annahme, dass alle Szenarien mangels besseren Wissens als gleichwahrscheinlich einzuschätzen sind, und die Summation über alle Szenarien daher im Mittel das beste Ergebnis erzielt.

Tabelle 6-14: Anwendung der Entscheidungsregeln bei Ungewissheit auf das Beispielgebäude

Entscheidungsregel	Maximin-Regel	Maximax-Regel	Hurwicz-Regel ( $\alpha = 0,5$ )	Savage-Niehans-Regel	Laplace-Regel
Inhalt Variante	Min(U)	Max(U)	$0,5 \cdot \text{Min}(U) + 0,5 \cdot \text{Max}(U)$	Max(R)	$\Sigma U$
Herkömmliche Tragstruktur	0,17	0,80	0,49	0,42	3,41
Flexible Tragstruktur (a)	0,06	0,72	0,39	0,11	3,44
Flexible Tragstruktur (b)	0,11	0,80	0,46	0,06	3,92

Die Anwendung der Entscheidungsregeln bei Ungewissheit zeigt, dass die favorisierte Variante nicht von den Präferenzen des Entscheiders unabhängig ist. Es soll daher im Folgenden versucht werden, die Situation unter Ungewissheit durch Einschätzen von Wahrscheinlichkeiten in eine Unsicherheitssituation zu überführen, und so weitere Erkenntnisse zu gewinnen.

### 6.8.3 Anwendung von Entscheidungsregeln bei Unsicherheit

Zu Abschätzung der Wahrscheinlichkeiten werden die Szenarien in einem Baumdiagramm angeordnet. Dies besitzt den Vorteil, dass nur die Wahrscheinlichkeiten am jeweiligen Verzweigungspunkt abgeschätzt werden müssen. Die Gesamtwahrscheinlichkeit ergibt sich durch Multiplikation der einzelnen Wahrscheinlichkeiten entlang eines Astes. In Abbildung 6-7 ist das Baumdiagramm für die Szenarien des Beispielgebäudes dargestellt. In ihr wird zunächst zwischen Szenarien mit einer langen Nutzungsdauer und Szenarien mit einer kurzen Nutzungsdauer unterschieden. Nach dem Prinzip des unzureichenden Grundes wird die Wahrscheinlichkeit für eine lange bzw. kurze Nutzungsdauer zu je ein Halb geschätzt. Unter den Szenarien mit kurzer Nutzungsdauer

(30 Jahre oder 40 Jahre oder 50 Jahre) wird die Wahrscheinlichkeit nach demselben Prinzip gleichmäßig zu je einem Drittel verteilt. Bei langer Nutzungsdauer verzweigt sich der Baum in Szenarien, die entweder keine, eine oder zwei Umnutzungen beinhalten. Dass eine Umnutzung erfolgt, wird für etwas wahrscheinlicher gehalten, als die Möglichkeit, dass gar keine Umnutzung erfolgt. Dass zwei Umnutzungen erfolgen wird für eher unwahrscheinlich gehalten. Daher werden den Ästen die Wahrscheinlichkeiten 0,35, 0,45 und 0,20 zugeordnet. Im Falle keiner Umnutzung ist zwischen den beiden Extremfällen „kein Umbau“ und „Umbau alle 20 Jahre“ zu unterscheiden. Beiden wird dieselbe Eintrittswahrscheinlichkeit unterstellt. Somit ergibt sich beispielsweise für Szenario 2 eine Eintrittswahrscheinlichkeit von  $p = \frac{1}{2} \cdot 0,35 \cdot \frac{1}{2} = 0,0875 = 8,75 \%$ .

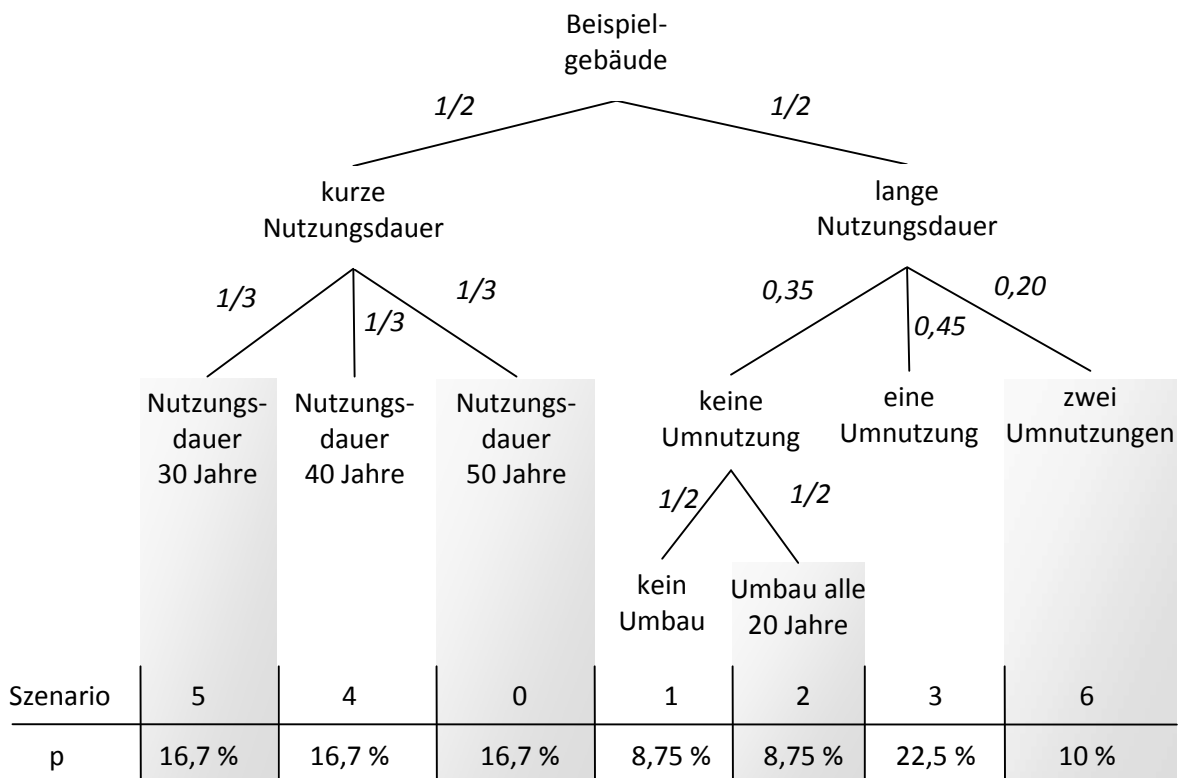


Abbildung 6-7: Baumdiagramm zur Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten  $p$

Mit den abgeschätzten Eintrittswahrscheinlichkeiten kann der Erwartungswert des Nutzens nach der Bayes-Regel bestimmt werden. Hierzu wird die Entscheidungsmatrix um eine Zeile mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten für jedes Szenario ergänzt und der Erwartungswert nach Gl. 3-10 berechnet (Tabelle 6-15).

Tabelle 6-15: Entscheidungsmatrix für das Beispielgebäude mit Eintrittswahrscheinlichkeiten

Szenario Nr. p [%]	0	1	2	3	4	5	6	Erwartungs- wert
	16,7	8,75	8,75	22,5	16,7	16,7	10	
Herkömmliche Tragstruktur	0,50	0,80	0,63	0,59	0,38	0,17	0,33	0,47
Flexible Tragstruktur (a)	0,39	0,72	0,59	0,65	0,34	0,06	0,68	0,46
Flexible Tragstruktur (b)	0,49	0,80	0,68	0,72	0,37	0,11	0,75	0,53

Des Weiteren kann die Hodges-Lehmann-Regel ausgewertet werden, die ein mit dem Koeffizienten  $\lambda$  gewichtetes Mittel zwischen dem Erwartungswert (Bayes-Regel) und der Schadensminimierung (Maximin-Regel) darstellt. Sie wird für  $\lambda = 0,2$  (stärkere Berücksichtigung der Maximin-Regel),  $\lambda = 0,5$  und  $\lambda = 0,8$  (stärkere Berücksichtigung der Bayes-Regel) ausgewertet.

Tabelle 6-16: Anwendung der Entscheidungsregeln bei Unsicherheit auf das Beispielgebäude

Entscheidungsregel	Bayes-Regel	Hodges-Lehman-Regel ( $\lambda = 0,2$ )	Hodges-Lehman-Regel ( $\lambda = 0,5$ )	Hodges-Lehman-Regel ( $\lambda = 0,8$ )
Inhalt	Gl. 3-10	Gl. 3-12	Gl. 3-12	Gl. 3-12
Variante				
Herkömmliche Tragstruktur	0,47	0,23	0,32	0,41
Flexible Tragstruktur (a)	0,46	0,14	0,26	0,38
Flexible Tragstruktur (b)	0,53	0,20	0,32	0,45

Nach der Bayes-Regel ist die flexible Struktur (b) die favorisierte Alternative (vgl. Tabelle 6-16). Die Hodges-Lehmann-Regel führt bei stärkerer Berücksichtigung der Entscheidungsregel für Ungewissheit ( $\lambda = 0,2$ ) zur Wahl der herkömmlichen Alternative, bei stärkerer Berücksichtigung der Bayes-Regel ( $\lambda = 0,8$ ) fällt die Wahl wiederum auf die flexible Tragstruktur. Bemerkenswert ist, dass ein Entscheider, der genau zwischen Schadensminimierung und Maximierung des Erwartungswerts tendiert ( $\lambda = 0,5$ ), zwischen beiden Varianten indifferent ist.

#### 6.8.4 Sensitivitätsanalysen

Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen soll geklärt werden, wie stark die oben erzielten Aussagen von den ihnen zugrundeliegenden Annahmen beeinflusst werden.

Bei Anwendung der Bayes-Regel ist stets eine Sensitivitätsanalyse zum Einfluss der geschätzten Eintrittswahrscheinlichkeiten sinnvoll. Im Vergleich von Abbildung 6-7 und Tabelle 6-15 wird deutlich, dass die herkömmliche Variante in Szenarien mit kurzer Nutzungsdauer favorisiert wird, die flexible Variante hingegen in Szenarien mit langer Nutzungsdauer. Entscheidend ist daher vor allem die Aufteilung der Wahrscheinlichkeiten an der ersten Verzweigung des Baumdiagramms, wo zwischen Szenarien mit langer bzw. kurzer Gesamtnutzungsdauer unterschieden wird.

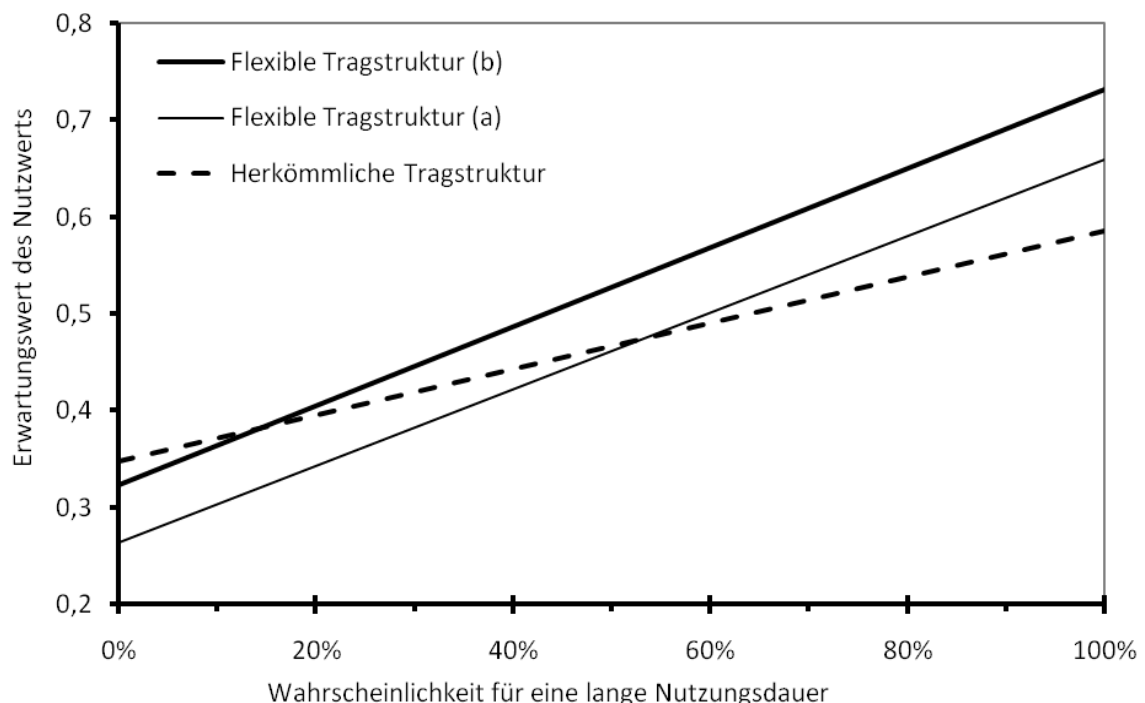


Abbildung 6-8: Sensitivität der Bayes-Regel gegenüber der Wahrscheinlichkeit für eine lange Nutzungsdauer

In Abbildung 6-8 ist der Erwartungswert des Nutzens für die Varianten gegen die Wahrscheinlichkeit für eine lange Nutzungsdauer aufgetragen. Nach der Bayes-Regel wird jeweils die Variante mit dem größeren Erwartungswert präferiert. Im Bereich der zuvor geschätzten Wahrscheinlichkeit für eine lange Nutzungsdauer von 50% ist die Reihenfolge der Varianten stabil gegenüber Veränderungen dieser Wahrscheinlichkeit. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die flexible Variante stets die Vorzugsalternative ist, wenn die Wahrscheinlichkeit für eine lange Nutzungsdauer auf mindestens 14 % geschätzt wird. Die herkömmliche Variante wird erst bevorzugt, wenn die Wahrscheinlichkeit für eine lange Nutzungsdauer auf weniger als 14 % geschätzt wird.

Weitere Sensitivitätsanalysen sind bezüglich der Annahmen der zugrunde liegenden Nutzwertanalyse sinnvoll. Insbesondere die Wichtung der Kriterien beeinflusst den errechneten Nutzen einer Variante und kann damit die Rangfolge der Varianten verändern. Es wurde daher die Sensitivität der Ergebnisse bei unterschiedlichen Wichtungen untersucht (Tabelle 6-17). Dabei wurde überprüft, ob die alleinige Ausrichtung der Entscheidung an den Lebenszykluskosten (nur Ökonomie) oder im gegenteiligen Fall an den Umwelt-Kriterien (nur Ökologie) die Vorzugvariante verändert. Außerdem wurde eine vereinfachte Wichtung, die eine Entscheidung anhand lediglich zweier Kriterien, nämlich Treibhauspotential und Lebenszykluskosten ermöglicht, verwendet. Mit den alternativen Wichtungen ergibt sich jeweils eine geänderte Entscheidungsmatrix, die in Anhang G dargestellt ist.

Tabelle 6-17: Alternative Wichtungsfaktoren zur Sensitivitätsanalyse

Hauptgruppe	Kriterium	Original-Wichtung	nur Ökonomie	nur Ökologie	vereinfacht
Ökologie	Treibhauspotential	15%	0%	30%	50%
	Ozonabbaupotential	5%	0%	10%	0%
	Versauerungspotential	5%	0%	10%	0%
	Eutrophierungspotential	5%	0%	10%	0%
	Bodennahe Ozonbildung	5%	0%	10%	0%
	Primärenergie n. e.	15%	0%	30%	0%
Ökonomie	Lebenszykluskosten	50%	100%	0%	50%

Die Untersuchung zeigt, dass nur wenige Szenarien bezüglich der Rangfolge der Alternativen und insbesondere bezüglich der favorisierten Alternative sensitiv auf eine Änderung der Wichtung reagieren. Dies ist nur in Szenario 0, 1 und 4 der Fall, in denen sich die erzielten Nutzwerte der Varianten nur marginal voneinander unterscheiden (vgl. Tabelle 6-11). Bei Änderung der Wichtungen verändert sich in diesen Szenarien die Reihenfolge zwischen herkömmlicher und flexibler Tragstruktur, wobei das Ergebnis jeweils knapp ausfällt. Bei stärkerer Berücksichtigung der Ökonomie wird eher die herkömmliche Tragstruktur bevorzugt, bei einer Ausrichtung auf Ökologie hingegen die flexible Tragstruktur

Die Rangfolge nach der vereinfachten Wichtung stimmt in allen Szenarien sehr gut mit der Original-Rangfolge überein. Im vorliegenden Fall könnte eine Nachhaltigkeitsanalyse also auch allein anhand der Kriterien Treibhauspotential und Lebenszykluskosten durchgeführt werden.

Während die Rangfolge der Alternativen in einzelnen Szenarien noch eine geringe Sensitivität gegenüber den Wichtungen der Nutzwertanalyse aufweist, verschwindet

dieser Einfluss bei Anwendung der Entscheidungsregeln. Sowohl alle oben angewendeten Entscheidungsregeln unter Ungewissheit als auch alle Entscheidungsregeln unter Unsicherheit führen stets zum selben Ergebnis. Durch Einbeziehen von Informationen über mehrere Szenarien wird das Ergebnis stabiler.

Schließlich wurde noch der Einfluss der Diskontrate als wesentlichem Parameter der Lebenszykluskostenrechnung untersucht (Tabelle 6-18).

Tabelle 6-18: Entscheidungsmatrizen für das Beispielgebäude bei unterschiedlichen Diskonraten

Szenario Nr.	0	1	2	3	4	5	6	Min	Max
Variante									
<b>Diskontrate 3,5 % (real)</b>									
Herkömmliche Tragstruktur	0,50	0,80	0,63	0,59	0,38	0,17	0,33	0,17	0,80
Flexible Tragstruktur (a)	0,39	0,72	0,59	0,65	0,34	0,06	0,68	0,06	0,72
Flexible Tragstruktur (b)	0,49	0,80	0,68	0,72	0,37	0,11	0,75	0,11	0,80
<b>Diskontrate 1,5 % (real)</b>									
Herkömmliche Tragstruktur	0,50	0,85	0,65	0,62	0,34	0,11	0,35	0,11	0,85
Flexible Tragstruktur (a)	0,40	0,78	0,63	0,71	0,33	0,02	0,76	0,02	0,78
Flexible Tragstruktur (b)	0,50	0,86	0,73	0,78	0,36	0,07	0,82	0,07	0,86
<b>Diskontrate 0 % (real)</b>									
Herkömmliche Tragstruktur	0,50	0,87	0,65	0,65	0,32	0,08	0,36	0,08	0,87
Flexible Tragstruktur (a)	0,41	0,82	0,66	0,74	0,33	0,02	0,81	0,02	0,82
Flexible Tragstruktur (b)	0,52	0,91	0,76	0,81	0,36	0,05	0,89	0,05	0,91

In der aktuellen Debatte der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden wird meist eine realer Diskontierungszinssatz von 5,5 % bei gleichzeitiger Preissteigerung für Bauleistungen von 2 % verwendet, so zum Beispiel im deutschen Zertifizierungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) [BMVBS (2009c, S.2.1.1/ff)]. Dies entspricht einer realen Diskontrate von 3,5 %. Wie in Kapitel 2.4.4 dargestellt ist, sollte bei langfristigen Betrachtungen eine Sensitivitätsrechnung mit niedrigeren Diskonraten durchgeführt werden. Bei niedrigen Diskonraten verlieren zukünftige Zahlungen nicht so stark an Gewicht wie bei hohen Diskonraten. Bewertungen fallen dann eher zugunsten von langlebigen Investitionen aus und eine Verschiebung von Erstinvestitionskosten hin zu Nutzungskosten wird verringert. Für die Szenarien des Beispielgebäudes wurden alternative Diskonraten von 1,5 % und 0 % betrachtet. Die Rangfolge der Varianten in den

einzelnen Szenarien reagiert stark sensitiv auf eine Änderung des Diskontsatzes. Beim ursprünglichen Diskontsatz von 3,5% ist das Verhältnis zwischen herkömmlicher und flexibler Variante recht ausgeglichen. Je nach Szenario stellt die eine oder andere die Vorzugsvariante dar – wie an den dunkel hinterlegten Feldern in Tabelle 6-18 zu erkennen ist. Bei einer geringeren Diskontrate verschiebt sich dieses Bild jedoch schnell zugunsten der flexiblen Variante. Zum einen werden die absoluten Nutzenunterschiede größer, zum anderen stellt die flexible Tragstruktur in fast allen Szenarien die bevorzugte Alternative dar. Lediglich in Szenario 5, das durch eine extrem kurze Nutzungsdauer ohne Umbaumaßnahmen gekennzeichnet ist, wird weiterhin die herkömmliche Tragstruktur favorisiert.

Die Verschiebung zugunsten der flexiblen Struktur zeigt sich auch in der Auswertung der Entscheidungsregeln, die diese nun mehrheitlich favorisieren. Lediglich nach der Maximin-Regel (Schadensminimierung) bleibt die herkömmliche Tragstruktur der Favorit.

### 6.8.5 Interpretation der Ergebnisse

Die zuvor dargestellte Analyse bietet eine breite Informationsbasis, auf der eine Entscheidung gefällt werden kann. Wie sich zeigte, spielt die Präferenz des Entscheiders die ausschlaggebende Rolle. Eine Aussage über die favorisierte Variante kann sowohl unter Ungewissheit als auch unter Unsicherheit nur in Zusammenhang mit der jeweiligen Entscheidungsregel getroffen werden. Die herkömmliche Tragstruktur wird nach dem Prinzip der Schadensminimierung und dem Prinzip der Gewinnmaximierung bevorzugt. Dies liegt vor allem darin begründet, dass sie in Szenarien mit kurzer Gesamtnutzungsdauer besser abschneidet. Entscheidet man jedoch nach dem Erwartungswert des Nutzens, oder danach, das Bedauern über eine falsche Variantenwahl zu minimieren, so fällt die Wahl auf die flexible Tragstruktur.

Die Beobachtung zeigt, dass herkömmliche Tragstrukturen die uns umgebende Baurealität dominieren. Es stellt sich daher die Frage, inwiefern die tatsächlichen Entscheidungen mit der hier vorgestellten Entscheidungsmethodik im Einklang stehen. Zwar mag es sein, dass Entscheidungen vorrangig aufgrund von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen und weniger unter ganzheitlicher Berücksichtigung ihrer Nachhaltigkeit gefällt werden. Dennoch zeigte sich die Methodik wenig sensitiv gegenüber der Gewichtung von Ökonomie zu Ökologie. Der Schlüssel zur Antwort liegt daher wohl eher in der Länge des Betrachtungszeitraums. Eine Lebenszyklusanalyse über 100 Jahre entspricht einer generationenübergreifenden Betrachtung, bei der Anfangs- und Folgeaufwendungen explizit berücksichtigt werden. Im Fokus des individuellen Entscheiders stehen jedoch auch heutzutage meist die Kosten der Erstinvestition, während Folgekosten eine untergeordnete Rolle spielen. Zwar gewinnt die Lebenszykluskostenanalyse auch in der

Baupraxis an Bedeutung, jedoch liegen typische Betrachtungszeiträume, z.B. in PPP-Projekten, oft bei nur 20 Jahren. Unter diesen Umständen, nämlich hohe Gewichtigkeit der Gegenwart gegenüber der Zukunft (= hohe Diskontrate) und kurze Betrachtungsdauer (= Szenario 0, 4 und 5) fällt die Wahl auf die herkömmliche Tragstruktur. Betrachtungen, die längere Zeiträume umfassen, werden häufig als Spekulation abgetan. Dennoch zeigt das obige Beispiel, dass durch die Anwendung von Szenarien auch größere Zeiträume analysiert werden können. Die Tendenz geht dann, insbesondere bei niedrigem Diskontsatz, eindeutig zur flexiblen Tragstruktur. Dabei muss im vorliegenden Fall die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Gebäude tatsächlich volle 100 Jahre genutzt wird, nicht einmal sehr hoch eingeschätzt werden.

Die Verwendung flexibler adaptiver Systeme ist nach dieser Auswertung gemessen an den vorgegebenen Nachhaltigkeitszielen insgesamt empfehlenswert.

## **6.9 Zusammenfassung**

Im vorliegenden sechsten Kapitel wurde die Anwendung der Methodik ausführlich an einem Beispielgebäude illustriert. Beim Untersuchungsobjekt handelte es sich um einen mehrstöckigen, innerstädtischen Geschossbau für Büro- und Wohnnutzung. Verglichen wurden eine Variante in herkömmlicher Bauweise und zwei Varianten mit flexiblem Deckensystem.

Die Einflussanalyse zeigte, dass der Basis-Kriterienkatalog auf die Kriterien der Ökobilanz und die Lebenszykluskosten reduziert werden konnte. Der Betrachtungsrahmen konnte sich aufgrund nahezu identischer Medienverbräuche aller Varianten auf die Konstruktion beschränken.

In der Ausgestaltung der Multikriterienbewertung orientierte sich das Beispiel weitgehend am bestehenden Zertifizierungssystem BNB. Jedoch konnten projektspezifische Referenzwerte angegeben werden.

Bei der Ausarbeitung der Szenarien zeigte sich, dass die Nutzungsfolge vor allem durch die künftige Organisation der Arbeitswelt, die zu erwartende Nutzungsmischung im Quartier, Lebensstil und Werteorientierung sowie den regionalen Strukturwandel bestimmt wird. Hieraus wurden sechs Szenarien zuzüglich eines Referenzszenarios abgeleitet. Die Szenarien unterschieden sich nicht nur in der Häufigkeit der Nutzungswechsel sondern auch in der Gesamtnutzungsdauer der Gebäude. Der entscheidende Unterschied zwischen den Varianten zeigte sich in Szenarien, die eine Umnutzung von Büro zu Wohnen forderten. Hier war aufgrund der geringen Flexibilität für die herkömmliche Bauweise ein Abriss und Neubau notwendig.

Die Analyse der Entscheidungsmatrix und die durchgeführten Sensitivitätsanalysen zeigten, dass je nach Entscheidungsregel, d. h. je nach Einstellung des Entscheiders,



sowohl die herkömmliche Tragstruktur als auch die flexible Tragstruktur bevorzugt wurde. Entscheidend war hier, inwiefern tatsächlich eine generationenübergreifende Sichtweise eingenommen wurde, wie es der Nachhaltigkeitsgedanke einfordert. Insgesamt war unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten die flexible Bauweise empfehlenswert.

## **7 RESÜMEE UND AUSBLICK**

### **7.1 Resümee**

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, die eine Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken unter Ungewissheit ermöglicht. Hierzu dienen die Nachhaltigkeitsziele, wie sie in Kapitel 2 dargelegt wurden, als Ausgangspunkt der Überlegungen. Dabei wurde auch die Vielzahl und Vielfalt der Kriterien, die in der langen Debatte um die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden aufgekomen waren, kritisch hinterfragt und in ihrer Eignung für verschiedene Anwendungszwecke eingeordnet. Es zeigte sich, dass die Kriterien der Ökobilanz und Lebenszykluskosten zu Recht eine bedeutsame Stellung einnehmen. Sie beruhen auf ausgereiften und anerkannten Methoden, die eine kardinale Quantifizierung ermöglichen. Zudem wird mit ihnen eine echte Lebenszyklusperspektive eingenommen. Ferner zeigte sich, dass bei der Entwicklung von Bewertungssystemen der normative Top-down-Ansatz geeignet ist, Kriterien streng an Nachhaltigkeitszielen auszurichten, eine problemspezifische Ergänzung jedoch sinnvoll ist.

In Kapitel 3 wurde ausführlich dargestellt, wie die Problemstellung aus Sicht der Entscheidungstheorie einzuordnen ist und welche Lösungsansätze in der Literatur existieren. Die Aufgabe besteht darin, mehrere Planungsalternativen in eine Rangfolge hinsichtlich ihres Beitrags zur nachhaltigen Entwicklung zu bringen. Die Entscheidung beruht auf einer Bewertung des Lebenszyklus, der in vielen Parametern zum Zeitpunkt der Planung noch unbekannt ist. Die Aufgabe war daher als eine Multikriterienentscheidung unter Ungewissheit zu charakterisieren. Von einem Multikriterienproblem war zu sprechen, da der Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung anhand mehrerer Kriterien gemessen wird, wobei den Kriterien teils gegenläufige Ziele zugrundeliegen. Da die Kriterien kardinal messbar sind oder zumindest einer quasi-kardinalen Bewertung zugeführt werden können, erschien als Lösungsansatz eine kompensatorische Bewertung geeignet. Favorisiert wurde hier die Nutzwertanalyse, die im deutschsprachigen Raum besser bekannt ist als das alternative Verfahren AHP, welches vor allem im englischsprachigen Raum verbreitet ist. Eine Entscheidung unter Ungewissheit im eigentlichen Sinne liegt vor, da für die Parameter des Lebenszyklus keine Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt sind. Hierfür wurden Entscheidungsregeln vorgestellt, die darauf beruhen, die Alternativen in allen Umweltzuständen zu bewerten. Häufig existieren Glaubwürdigkeitsvorstellungen, die wie objektive Wahrscheinlichkeiten behandelt werden können. Damit erschloss sich ein neues Feld von Entscheidungsregeln für Situationen unter Unsicherheit, auch Risikosituation genannt. Aus der endlosen Zahl möglicher Umweltzustände können mit Hilfe der Szenariotechnik einzelne Lebenswege als Szenarien entwickelt werden. Diese beruhen im Gegensatz zur reinen Spekulation auf fundierten Zukunftsannahmen.

In Kapitel 4 dieser Arbeit wurde anschließend die Methodik zur Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken bei ungewissem Lebensweg entwickelt, die im Kern auf der Nutzwertanalyse und der Szenariotechnik basiert. Die Methodik ist dank diverser Anpassungsmöglichkeiten für den Bewertenden flexibel auf viele Aufgabenstellungen anwendbar. Dies betrifft insbesondere den Kriterienkatalog, den Maßstab für die Kriterienbewertung und deren Gewichtung.

Zunächst konnte ein *Kriterienkatalog* vorgestellt werden, der verschlankt wurde, da nur gebäudebezogene Kriterien in den Katalog aufgenommen und alle prozessbezogenen Kriterien ausgeschlossen. Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass die Ausrichtung von Planungs-, Vergabe-, Bau- und Nutzungsprozessen am Leitbild der nachhaltigen Entwicklung ebenso bedeutend ist. Einige Themen-/Problemfelder des nachhaltigen Bauens können nur über prozessbezogene Kriterien adressiert werden. Dies liegt jedoch jenseits des Anwendungsbereichs der vorliegenden Methodik, die dazu dienen soll, Konstruktionen zu optimieren (*was* gebaut wird, nicht *wie* es gebaut wird). Dieser Kriterienkatalog kann in Abhängigkeit der Aufgabenstellung in der Regel noch weiter gekürzt werden, da nur die jeweils relevanten Kriterien zu betrachten sind.

Für die Kriterienbewertung wurde eine allgemeine, lineare Nutzwertfunktion vorgeschlagen. Der lineare Zusammenhang ist unabhängig vom Projekt zunächst plausibel, doch kann bei weiteren Zusatzinformationen die Nutzwertfunktion angepasst werden. Als *Bewertungsmaßstab* dienen projektspezifische Grenz- und Zielwerte. Wo diese fehlen, können sie aus der Ergebnismatrix selbst abgeleitet werden. Die sich ergebende Rangfolge ist dann jedoch nur im Rahmen der betrachteten Varianten gültig.

Die *Gewichtung* der Kriterien muss entsprechend den Präferenzen des Entscheiders gewählt werden. Hier sollte regelmäßig von der Methode der paarweisen Vergleiche nach AHP Gebrauch gemacht werden, die die Möglichkeit konsistenterer Gewichtungen bietet. In der Gewichtung des BNB-Systems kann ein guter Ausgangspunkt für eigene Überlegungen gesehen werden.

Das eigentliche Verfahren besteht in einer Bewertung von Planungsvarianten in diversen Szenarien. Die Auswahl der Planungsvarianten ergibt sich dabei wie bei jeder Variantenuntersuchung aus der Fragestellung. In Iterationsschritten kann die Untersuchung von wenigen Grobvarianten hin zu detaillierteren Untervarianten verfeinert werden. Der Betrachtungsrahmen der Untersuchung ist dabei so weit zu ziehen, dass alle wesentlichen Auswirkungen, in denen sich die Varianten voneinander unterscheiden, erfasst sind. Andererseits sollte er aus Gründen der Effizienz nicht größer gewählt werden.

In der Entwicklung der Szenarien liegt ein kritischer Schritt der vorgestellten Methodik. Besonders eine sorgfältige Umfeldanalyse, die Auswahl der kritischen Deskriptoren und die Wahl plausibler Zukunftsannahmen bestimmen die Qualität der gesamten Analyse.

Die Zukunftsannahmen werden zu konsistenten Annahmebündeln zusammengefasst und jeweils in einen Lebensweg für die Gebäudevariante übersetzt. Im Modell des Lebenswegs sind dabei alle stoffstromrelevanten Prozesse von der Herstellung über Betriebs- und Instandhaltungsprozesse bis hin zum Rückbau zu erfassen.

Als Bezugsgröße für kardinale Kriterien mit Lebenszyklusbezug wurden Nutzfläche und Nutzungszeit vorgeschlagen. Dies hat für das Kriterium Lebenszykluskosten zur Folge, dass als Indikator die Annuität, nicht der Barwert, verwendet werden muss. So können Varianten mit unterschiedlicher Nutzungsdauer und Flächeneffizienz miteinander verglichen werden.

Die Anwendungsfelder, die sich für die hier entwickelte Methodik der Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken bei ungewissem Lebensweg ergeben, sind weitreichend, wie in Kapitel 5 exemplarisch dargestellt wurde. Typische Fragestellungen ergeben sich, wenn Bauteile Reserven bieten, also einem heutigen Mehraufwand mögliche zukünftige Einsparungen gegenüberstehen. Inwiefern die erhofften Einsparungen realisiert werden können, hängt jedoch von Entwicklungen ab, die heute noch ungewiss sind. Es wurde gezeigt, dass dies unter anderem auf den Aspekt der Reinigungsfreundlichkeit, verschiedene Instandhaltungsstrategien, Aspekte des Nutzerkomforts, die Instandsetzungsfreundlichkeit, Umnutzungsfähigkeit und recyclinggerechtes Bauen zutrifft. Die Methodik ist aufgrund ihrer Anpassbarkeit nicht nur auf die genannten Themenstellungen anwendbar sondern kann sicher auf weitere Fragestellungen übertragen werden, auch wenn ihrer Anwendung zum Teil noch Datenlücken bei Basisdaten entgegenstehen.

Das Anwendungsbeispiel in Kapitel 6 veranschaulichte den Bewertungsablauf. Die Fragestellung betraf die Adaptivität, die mit unterschiedlichen Deckentragsystemen an einem innerstädtischen Geschossbau erreicht werden kann. Das Gebäude entstammt dem DAfStb-Verbundforschungsvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“. Hier war ein flexibles Deckentragsystem entwickelt worden, das eine Nutzungsänderung zwischen Büro und Wohnen ermöglicht. Die gegenübergestellte herkömmliche Bauweise war zwar durch geringere Anfangsaufwendungen – in ökologischer und ökonomischer Hinsicht – gekennzeichnet. Jedoch war eine Umnutzung nicht möglich. Es wurden mehrere Szenarien entwickelt, die sich ausgehend von der Bedarfsentwicklung im Quartier in der Abfolge der Nutzungen unterscheiden. Es zeigte sich, dass das flexible System nicht nur bei einer Nutzungsänderung vorteilhaft ist, sondern auch, wenn der Innenausbau geändert wird. Welcher Variante insgesamt der Vorzug zu geben ist, war von der Entscheidungsregel und den damit verbundenen Präferenzen des Entscheiders abhängig. Keinen nennenswerten Einfluss auf die Rangfolge der Alternativen hatten hingegen die Gewichtungen der Nutzwertanalyse. Im vorliegenden Fall könnte eine richtungstreue Nachhaltigkeitsanalyse auch allein anhand der Kriterien Treibhauspotential und Lebenszykluskosten durchgeführt werden. Weitere Sensitivitätsanalysen zeigten, dass die

flexible Struktur bei langfristiger Denkweise des Entscheiders bevorzugt wird. Sie belegt zum Beispiel den ersten Rang, wenn die Diskontrate der Lebenszykluskostenrechnung niedrig angesetzt wird, oder wenn eine lange Gesamtnutzungsdauer als nicht sehr unwahrscheinlich eingeschätzt wird. Dass in der Realität meist die herkömmliche Bauweise anzutreffen ist, ist wohl damit zu erklären, dass derartig langfristige, generationenübergreifende Betrachtungen in der Praxis selten erfolgen.

### 7.2 Ausblick

Das Anwendungsbeispiel zeigte, dass speziell für Nutzungsänderungen geplante Deckentragsysteme unter den betrachteten Nachhaltigkeitsgesichtspunkten zu einem vorteilhafteren Gebäude beitragen. In Anlehnung hieran könnten weitere Strategien für umnutzungsfähige Gebäude überprüft werden. Als Beispiel sei die Raumhöhe genannt. In Fragekatalogen [Lambertz (2010, S. 157)] werden 2,75 m bzw. 3,00 m lichte Raumhöhe als Mindestanforderung für einen adaptierbaren Grundriss gefordert. Hintergrund ist, dass jede Nutzung eine ausreichende lichte Raumhöhe erfordert [§6 (1) ArbStättV]. Eine heute geplante Raumhöhe kann sich in Zukunft als zu niedrig herausstellen, wenn z.B. Räume mit größerer Grundfläche geschaffen werden oder aufgrund anderer Nutzungsarten zusätzliche Installationen unter der Decke oder auf dem Fußboden notwendig werden. Bereits heute eine größere Höhe vorzuhalten, ist jedoch mit Nachteilen verbunden, da erstens der umbaute Raum bei gleicher Nutzfläche zunimmt. Zweitens kann je nach zulässiger Gesamthöhe des Gebäudes ein Geschoss und damit Nutzfläche verloren gehen. Der Vorteil, der sich ergeben kann, wenn ein Abriss und Neubau vermieden werden können, kann nur über Szenarien quantifiziert werden.

Indem die vorgestellte Methodik auf die eben beschriebene und ähnliche Fragestellungen angewendet wird, kann eine belegbare Wissensgrundlage für Strategien des nachhaltigen Bauens geschaffen werden. Des Weiteren kann sie genutzt werden, um auf gleiche Weise die Checklisten bestehender Zertifizierungssysteme zu validieren. Von Interesse wäre beispielsweise eine Überprüfung, wie groß das Potential der abgefragten Maßnahmen bezüglich künftiger Einsparungen ist, und ob sich dies in der Bepunktung widerspiegelt. Indem Maßnahmen mit einem geringen Potential herausgenommen werden, könnten die Checklisten zusätzlich vereinfacht werden.

Die obigen Ausführungen und Beispiele bezogen sich bislang auf den Hochbau. Doch bereits eingangs (Abschnitt 4.2.2) wurde darauf hingewiesen, dass es sich um eine generelle Methodik handelt, die auch auf andere Bauwerksarten übertragbar ist. Viele weitere Fragestellungen ergeben sich beispielsweise im Infrastrukturbau. Aufgrund der langen Nutzungsdauer der Bauwerke stellt sich hier insbesondere die Frage, inwiefern es sich lohnt, zukunftsfähig zu planen.

Ein Beispiel derartiger Überlegungen ist bei mehreren Brückenbauwerken der Eisenbahnneubaustrecken zu finden (z.B. Humbachtalbrücke). Die mehrfeldrigen Brücken wurden dort als Kette von vorgespannten Einfeldträgern ausgeführt. Diese sind im Vergleich zu Mehrfeldträgern mit größeren Anfangsaufwendungen verbunden, u.a. wegen der größeren erforderlichen Querschnitte und breiterer Auflagerflächen. Dem steht eine erhoffte Einsparung im Schadensfall gegenüber, da nur das betroffene einzelne Feld instandgesetzt werden müsste. Die Thematik könnte mit der vorgestellten Methodik unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit betrachtet werden. Als relevante Kriterien wären hier nicht nur die Kosten unter Einbeziehung von Zeitverlusten im Instandsetzungsfall sondern auch Umweltbelastung und Ressourcenverbrauch zu nennen. Des Weiteren stellt auch die Ästhetik, die bei den vorliegenden Brücken in der Fachwelt häufig kritisiert wurde, ein Entscheidungskriterium dar [Marx & Schlaich (2009)]. Für die Entwicklung der Szenarien könnten Eintrittswahrscheinlichkeiten für diverse Schadensfälle erhoben werden. Die Anwendung der Bayes-Regel, d.h. die Maximierung des Erwartungswertes, ist bei der Analyse besonders gerechtfertigt, da es sich hierbei nicht um eine Einzelentscheidung handelt, sondern um eine Bauwerksreihe. Hier entsprechen die voneinander unabhängig eintretenden Lebenswege im Mittel dem Erwartungswert aus den Szenarien.

Zur Unterstützung für eine breite Anwendung der vorgestellten Methodik zur Nachhaltigkeitsanalyse wären ergänzende Forschungsarbeiten hilfreich. Beispielsweise wären für bestimmte Fragestellungen Ökobilanzprofile für Instandhaltungs- und Entsorgungsprozesse in detaillierterer Form zu erarbeiten als sie in derzeitigen Datenbanken [z.B. BMVBS (2009b), GaBi 4 (2007)] vorhanden sind.

Es wäre wünschenswert, wenn die vorliegende Arbeit dazu beiträgt, die Methodik der Lebenszyklusbetrachtung im Bauwesen weiter zu etablieren.



## 8 LITERATURVERZEICHNIS

- Aberle, Gerd (2009):** Transportwirtschaft. Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen. 5., überarb. und erg. Aufl., Oldenbourg. München, 2009.
- AgBB, Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (2010):** Gesundheitliche Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC und SVOC) aus Bauprodukten. o.O., 2010.
- ArbStättV:** Verordnung über Arbeitsstätten - ArbStättV, vom 12.08.2004, zuletzt geändert 19.12.2008. In: Bundesgesetzblatt, S. 2179.
- ArbStättV:** Verordnung über Arbeitsstätten - ArbStättV, vom 12.08.2004, zuletzt geändert 19.12.2008. In: Bundesgesetzblatt, S. 2179.
- ARGE KWB, Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (2007):** 5. Monitoring-Bericht Bauabfälle - Erhebung 2004. Berlin, 2007.
- Arge Zementindustrie (2002):** Sozialpolitische Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Zementindustrie, der Industriegewerkschaft Bauen-Agrar-Umwelt sowie der Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie: Nachhaltigkeit und Zementindustrie - Dokumentation von Beiträgen und Handlungsoptionen. Unter Mitarbeit von Ralf Löckener und Birgit Trimmer. Bau+Technik, Düsseldorf, 2002.
- Bamberg, Günter; Coenenberg, Adolf Gerhard; Krapp, Michael (2008):** Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre. 14., überarb. Aufl., Vahlen. München, 2008.
- Bandemer, Hans; Gottwald, Siegfried (1993):** Einführung in die Fuzzy-Methoden. Theorie und Anwendungen unscharfer Mengen. 4. Aufl., Akademie Verlag. Berlin, 1993.
- Barthauer, Matthias (2008):** Ökologische Nachhaltigkeit von Büroimmobilien. Jones Lang LaSalle. o.O., 2008.
- BBR (2001):** Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Herausgegeben von Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. Berlin, 2001.
- BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2009):** Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen der Kostengruppen 300, 400 und 500 nach DIN 276-1. Entwurf der BBSR-Endfassung vom 20.10.2009. Berlin, 2009.
- Bellmer, Jens (o.J.):** Hygiene in Lüftungsanlagen. Herausgegeben von Bellmer Hausanalyse. Online verfügbar unter [http://www.special-clean.com/bilder/downloads/Hygiene\\_in\\_Lueftungsanlagen.pdf](http://www.special-clean.com/bilder/downloads/Hygiene_in_Lueftungsanlagen.pdf), zuletzt aktualisiert am 23.06.2005, zuletzt geprüft am 23.07.2010.
- Benetto, Enrico; Dujet, Christiane; Rousseaux, Patrick (2008):** Integrating fuzzy multicriteria analysis and uncertainty evaluation in life cycle assessment. In: Environmental Modelling & Software, Jg. 23, H. 12, S. 1461–1467.



- BGBau, Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (2010):** Jahresbericht 2009. Berlin, 2010.
- Birg, Herwig (2000):** Trends der Bevölkerungsentwicklung. Auswirkungen der Bevölkerungsschrumpfung, der Migration und der Alterung der Gesellschaft in Deutschland und Europa bis 2050, insbesondere im Hinblick auf den Bedarf an Wohnraum. Frankfurt am Main, 2000 (Schriftenreihe des Verbands deutscher Hypothekenbanken).
- BKI, Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (2009):** BKI Baukosten 2009. Teil 1: Statistische Kostenkennwerte für Gebäude. BKI. Stuttgart, 2009.
- BMVBS (2009a):** Informationsportal Nachhaltiges Bauen: Baustoff- und Gebäudedaten - Nutzungsdauern von Bauteilen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung - Referat Nachhaltiges Bauen (Berlin). Online verfügbar unter <http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/nutzungsdauern-von-bauteilen.html>, zuletzt geprüft am 12.04.2010.
- BMVBS (2009b):** Informationsportal Nachhaltiges Bauen: Baustoff- und Gebäudedaten - Ökobau.dat. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung - Referat Nachhaltiges Bauen (Berlin). Online verfügbar unter <http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/oekobaudat.html>, zuletzt geprüft am 15.10.2009.
- BMVBS (2009c):** Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude - Steckbriefe. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung - Referat Nachhaltiges Bauen. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.nachhaltigesbauen.de>, zuletzt geprüft am 26.02.2010
- BMVBS (2010):** Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) – Bewertungsmethodik, Gewichtung und Bedeutungsfaktoren. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung - Referat Nachhaltiges Bauen. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.nachhaltigesbauen.de>.
- Bogenstätter, Ulrich (2007):** Technische Lebensdauern - Synopse. ifBOR TLD 2007-10. Herausgegeben von ifBOR. Institute for Building Operations Research. Nürtingen-Geislingen, 2007.
- Bourdeau, Luc; Nibel, Sylviane (2004):** CRISP. A European Thematic Network on Construction and City Related Sustainability Indicators - Final Report Publishable part. Online verfügbar unter [http://crisp.cstb.fr/PDF/CRISP\\_Final\\_Report.pdf](http://crisp.cstb.fr/PDF/CRISP_Final_Report.pdf), zuletzt aktualisiert am 18.11.2005, zuletzt geprüft am 30.09.2009.
- BREEAM Office (2009):** BREEAM - The environmental assessment method for buildings around the world. Watford, UK. Online verfügbar unter [www.breeam.org](http://www.breeam.org), zuletzt geprüft am 28.09.2010.
- Bruck, Manfred; Geissler, Susanne (2002):** Leitfaden für die TQ Bewertung - Kostengünstige, nutzer- und umweltfreundliche Gebäude. Version 2.0 des TQ-Bewertungstools. Unter Mitarbeit von Maria Fellner, Robert Lechner, Verena Frosch et al. Österreichisches Ökologie-Institut (Wien) und Kanzlei Dr. Bruck (Wien), 2002.

- Bundesregierung (2002):** Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine Nachhaltige Entwicklung. Bundesregierung. Berlin, 2002.
- Carlowitz, Hannß Carl von; Irmer, Klaus; Grober, Ulrich (2000):** Sylvicultura oeconomica - Anweisung zur wilden Baum-Zucht. TU Bergakademie. Freiberg, 2000 (Veröffentlichungen der Bibliothek "Georgius Agricola" der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 135).
- Coenen, Reinhard; Grunwald, Armin (2003):** Nachhaltigkeitsprobleme in Deutschland - Analyse und Lösungsstrategien. ed. Sigma. Berlin, 2003 (Global zukunftsfähige Entwicklung - Perspektiven für Deutschland, 5).
- DAfStb (2010):** Der Stadtbaustein im DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhaben "Nachhaltig Bauen mit Beton" - Dossier zu Nachhaltigkeitsuntersuchungen. 1. Aufl., Beuth. Berlin, 2010 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 588).
- DAfStb (i.V.):** Grundsätze des Nachhaltigen Bauens mit Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. Berlin, in Vorbereitung (DAfStb-Richtlinie).
- DGNB (2009):** Das deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen - Aufbau - Anwendung - Kriterien. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (DGNB). Online verfügbar unter [http://www.dgnb.de/fileadmin/downloads/DGNBSystembeschreibung\\_de\\_44S\\_20090423\\_online.pdf](http://www.dgnb.de/fileadmin/downloads/DGNBSystembeschreibung_de_44S_20090423_online.pdf), zuletzt aktualisiert am 03.03.2009, zuletzt geprüft am 30.09.2009.
- DIN 1045-1 (2005-07):** Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion.
- DIN 18025-2 (1992-12):** Barrierefreie Wohnungen – Planungsgrundlagen.
- DIN 18195 (Normenreihe):** Bauwerksabdichtungen.
- DIN 18960 (2008-02):** Nutzungskosten im Hochbau.
- DIN 276-1 (2008-12):** Kosten im Bauwesen - Teil 1: Hochbau.
- DIN 277-3 (2004-04):** Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau – Teil 3: Mengen und Bezugseinheiten.
- DIN 31051 (2003-06):** Grundlagen der Instandhaltung.
- DIN 4108-2 (2003-07):** Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden –Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- DIN 4108-3 (2001-07):** Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.
- DIN 4109 (1989-11):** Schallschutz im Hochbau.
- DIN EN 15251 (2007-08):** Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.
- DIN EN 1998-1 (2010-12):** Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben. Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009

- DIN EN ISO 14040 (2009-11):** Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006).
- DIN EN ISO 14044 (2006-10):** Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006).
- DIN EN ISO 7730 (2006-05):** Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005).
- DIN V 18599 (2007-02):** Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung.
- DIN V 4108-6 (2003-06):** Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.
- Dönitz, Ewa J. (2009):** Effizientere Szenariotechnik durch teilautomatische Generierung von Konsistenzmatrizen - Empirie, Konzeption, Fuzzy- und Neuro-Fuzzy-Ansätze. Univ., Diss.--Bremen, 2008. 1. Aufl., Gabler. Wiesbaden, 2009 (Springer-11775 /Dig. Serial]).
- Dörsam, Peter (2007):** Grundlagen der Entscheidungstheorie anschaulich dargestellt. Ausführliche Darstellung der wichtigsten Zusammenhänge, Aufgaben mit detaillierten Lösungsvorschlägen. 5., überarb. Aufl., PD-Verl. Heidenau, 2007.
- Dreßen, Tobias (2010):** Das Referenzbeispiel - Bürogebäude mit Tiefgarage - Tragstruktur. In: BFT International Betonwerk + Fertigteil-Technik, Jg. 76, H. 02, S. 32–33.
- Dt. Bundestag (1998):** Konzept Nachhaltigkeit - Vom Leitbild zur Umsetzung; Abschlußbericht der Enquete-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer Nachhaltig Zukunftsverträglichen Entwicklung" des 13. Deutschen Bundestages. Dt. Bundestag Referat Öffentlichkeitsarbeit. Bonn, 1998 (Zur Sache, 98.4).
- Dyer, James S.; Fishburn, Peter C.; Steuer, Ralph E.; Wallenius, Jyrki; Zionts, Stanley (1992):** Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: The Next Ten Years. In: Management Science, Jg. 38, H. 5, S. 645–654.
- Ecoinvent (2010):** Ecoinvent - data. Version 2.1. Ecoinvent Centre (Swiss Centre for Life Cycle Inventories). St-Gallen, 2010.
- Ellingham, Ian; Fawcett, William (2001):** Options-based evaluations of façade refurbishment alternatives. In: Whole Life Performance of Facades. Bath, UK, S. 41–50.
- Ellingham, Ian; Fawcett, William (2006):** New generation whole-life costing - Property and construction decision-making under uncertainty. Taylor & Francis. London, 2006.
- FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen-und Verkehrswesen (1997):** EWS - Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen - Aktualisierung der RAS-W 86. (FGSV, 132).

- Friedrich, Alfred (2006):** Logik und Fuzzy-Logik - Eine leichtverständliche Einführung mit Beispielen aus Technik und Wirtschaft. 2., durchges. Aufl., expert-Verl. Renningen, 2006.
- GaBi 4 (2007):** GaBi 4 - Software-System and Databases for Life Cycle Engineering, PE International. Stuttgart, 2007
- Gareis Karsten; Kordey Norbert; Korte Werner (2002):** Räumliche Wirkungen der Telearbeit - Auswirkungen auf die Stadtentwicklung. In: Floeting, Holger (Hg.): "Neue Medien" und Stadtentwicklung - Expertenbeiträge. Materialien des Deutschen Instituts für Urbanistik 5/2002, S. 35–43.
- Gehlen, Christoph (2000):** Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken - Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Beuth. Berlin, 2000 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 510).
- Geldermann, Jutta; Spengler, Thomas; Rentz, Otto (2000):** Fuzzy outranking for environmental assessment. Case study: iron and steel making industry. In: Fuzzy Sets and Systems, Jg. 115, H. 1, S. 45–65.
- Geschka, Horst (2006):** Szenariotechnik als Instrument der Frühaufklärung. In: Gassmann, Oliver; Kobe, Carmen (Hg.): Management von Innovation und Risiko. Quantensprünge in der Entwicklung erfolgreich managen. Zweite, überarbeitete Auflage. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, S. 357–372.
- González, B.; Adenso-Díaz, B.; González-Torre, P. L. (2002):** A fuzzy logic approach for the impact assessment in LCA. In: Resources, Conservation and Recycling, Jg. 37, H. 1, S. 61–79.
- Götze, Uwe (2008):** Investitionsrechnung - Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 6. durchgesehene und aktualisierte Auflage. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, 2008.
- Götze, Uwe; Bloech, Jürgen (2002):** Investitionsrechnung - Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 3. verb. und erw. Aufl., Springer. Berlin, 2002.
- Graubner, Carl-Alexander; Lützkendorf, Thomas (2008):** Bewertung und Zertifizierung der Nachhaltigkeit von Gebäuden. In: Mauerwerk, Jg. 12, H. 2, S. 53–60.
- Graubner, Carl-Alexander; Lützkendorf, Thomas; Reinhardt, Sandy; Schneider, Carmen; Hock, Carolin (2008):** Ausarbeitung des nationalen Nachhaltigkeitszertifizierungssystems. Erstellung von Kriteriensteckbriefen für ausgewählte Kriterien. Endbericht zu einem Projekt des Forschungsprogramms "Zukunft Bau". Herausgegeben vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Bonn, 2008 (BBR-Online-Dokumentation).
- Graubner, Carl-Alexander; Lützkendorf, Thomas; Reinhardt, Sandy; Schneider, Carmen; Hock, Carolin; Zak, Jan (2007):** Studie zur Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden. Endbericht zu einem Projekt des Forschungsprogramms "Zukunft Bau". Herausgegeben vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Bonn, 2007 (BBR-Online-Dokumentation).

- Grael, Adolf (1995):** Fuzzy-Logik - Einführung in die Grundlagen mit Anwendungen. BI-Wiss.-Verl. Mannheim, 1995.
- Grob, Heinz Lothar (2003):** Das Preis-Leistungsmodell. Institut für Wirtschaftsinformatik Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2003 (Computergestütztes Controlling Arbeitsberichte, 13).
- Groß, Jürgen (2009):** Nachhaltigkeit – Erfolgsfaktor in der Projektentwicklung? In: Linke, Hans-Joachim (Hg.): 1. Darmstädter Ingenieurkongress Bau und Umwelt. 14. und 15. September 2009; Tagungsband. TU Darmstadt, FB Bauingenieurwesen und Geodäsie, 2009 (Darmstädter Ingenieurkongress Bau und Umwelt, 1), S. 119–120.
- Grünig, Rudolf; Kühn, Richard (2006):** Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme - Ein heuristischer Ansatz. 2. Auflage., Springer. Berlin, Heidelberg, 2006.
- Grunwald, Armin; Kopfmüller, Jürgen (2006):** Nachhaltigkeit. Campus-Verl. Frankfurt am Main, 2006.
- Hammonia (2004):** Mietwohnungen in Deutschland - ein attraktives und wertbeständiges Marktsegment - Entwicklung, Besonderheiten und aktuelle Trends im internationalen Vergleich. Hammonia Verlag. Hamburg, 2004.
- Hauff, Volker (Hg.) (1987):** Unsere gemeinsame Zukunft - Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Eggenkamp. Greven, 1987.
- Heinze, Rolf G.; Eichener, Volker; Naegele, Gerhard; Bucksteeg, Mathias; Schauerte, Martin (1997):** Neue Wohnung auch im Alter - Folgerungen aus dem demographischen Wandel für Wohnungspolitik und Wohnungswirtschaft. Kurzfassung. Schader-Stiftung Darmstadt, 1997.
- Herzog, Kati (2005):** Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen - Entwicklung eines Modells und einer Softwarekomponente zur ökonomischen Analyse und Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden. Darmstadt, 2005 (Dissertation / Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 10).
- Hoffmann, Jens (2006):** Indikatoren für ein Integriertes Küstenzonenmanagement - Theoretische Grundlagen. Hochschule Neubrandenburg, 2006 (IKZM-Oder Berichte).
- Hüske, Katja (2001):** Nachhaltigkeitsanalyse demontagegerechter Baukonstruktionen - Entwicklung eines Analysemodells für den Entwurf von Gebäuden. Darmstadt, 2001 (Dissertation / Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 2).
- Hwang, Ching-Lai; Yoon, Kwangsun (1981):** Multiple attribute decision making - Methods and applications; a state-of-the-art-survey. Springer. Berlin, 1981 (Lecture notes in economics and mathematical systems, 186).
- I BGB, Institut für Baumanagement, Gebäudemanagement und Bewertung (2008):** RealFM Benchmarking Report 2007.
- IfM, Insitut für Massivbau (unveröffentlicht):** bauloop. Version 2010. Darmstadt, Fachgebiet Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

- ISO 21931-1 (2010-06):** Sustainability in building construction - Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works - Part 1: Buildings.
- ISO/TS 21929-1 (2006-03):** Hochbau – Nachhaltiges Bauen – Nachhaltigkeitsindikatoren.
- JaGBC; JSBC (2008):** CASBEE - Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency. Japan GreenBuild Council (JaGBC); Japan Sustainable Building Consortium (JSBC). Tokyo, 2008.
- Jones Lang LaSalle (2009):** Oscar 2009 - Büronebenkostenanalyse.
- Jörissen, Juliane; Coenen, Reinhard; Stelzer, Volker (2005):** Zukunftsfähiges Bauen und Wohnen - Herausforderungen, Defizite, Strategien. ed. Sigma. Berlin, 2005 (Global zukunftsfähige Entwicklung - Perspektiven für Deutschland, 7).
- Kalusche, Wolfdietrich (2006):** Technische Lebensdauer von Bauteilen und wirtschaftliche Nutzungsdauer eines Gebäudes - Festschrift zum 60. Geburtstag von Professor Dr. Hansruedi Schalcher. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2006.
- Keeney, Ralph L.; Raiffa, Howard (1976):** Decisions with multiple objectives - Preferences and value tradeoffs. Wiley. New York, NY, 1976 (Wiley series in probability and mathematical statistics).
- Keune, Achim (2008):** Innenraumluftqualität und Hygiene-Anforderungen an die Raumlufttechnik - Kommentar zur VDI 6022 und VDI 6032. 1. Aufl., Beuth. Berlin, 2008.
- Kishk, Mohammed; Al-Hajj, Assem (2000):** A fuzzy model and algorithm to handle subjectivity in life cycle costing based decision-making. In: Journal of Financial Management of Property and Construction, Jg. 5, H. 1-2, S. 93–104.
- Knieß, Michael (2006):** Kreativitätstechniken - Möglichkeiten und Übungen. Orig.-Ausg., Dt. Taschenbuch-Verl. München, 2006 (Beck im dtv, 50906).
- Kohler, Niklaus; Hassler, Uta (1999):** Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen - Mit 93 Tabellen. Springer. Berlin, 1999 (Konzept Nachhaltigkeit).
- König, Holger; Kohler, Niklaus; Kreißig, Johannes; Lützkendorf, Thomas (2009):** Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung - Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge. 1. Aufl., Inst. für Int. Architektur-Dokumentation Ed. Detail. München, 2009 (Edition Detail green books).
- Kordey, Norbert; Korte, Werner B. (2005):** Auswirkungen des demographischen Wandels auf Unternehmen und mögliche Maßnahmen zur Sicherung der Beschäftigung älterer Arbeitnehmer. empirica Schriftenreihe. Bonn, 2005 (Zukunft der Arbeit).
- Kötz, Wolf-Dietrich (2000):** Vorbeugender Schallschutz im Wohnungsbau - Meinungen - Vorschläge - Richtlinien. In: Bundesbaublatt, Jg. 49, H. 12.
- Lambertz, Michaela (2010):** Entwicklung eines Verfahrens zur Bewertung der sozialen Nachhaltigkeitsdimension von Bürogebäuden. zugl.: Aachen, Techn. Univ. Dissertation 2009 VDI-Verl. Düsseldorf, 2010 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 4, Bauingenieurwesen, 212).

- Laux, Helmut (2007):** Entscheidungstheorie - Mit 12 Tabellen. 7. überarb. und erw. Aufl., Springer. Berlin, 2007.
- Lillich, Lothar (1992):** Nutzwertverfahren. Physica-Verl. Heidelberg, 1992 (Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre, 3).
- Lützkendorf, Thomas (2006):** Wohneigentum und nachhaltige Entwicklung - von der Mitverantwortung zur Mitgestaltung. In: Stürmer, Michael (Hg.): Kultur des Eigentums. Springer. Berlin Heidelberg, 2006 (Bibliothek des Eigentums, 3).
- Mag, Wolfgang (1990):** Grundzüge der Entscheidungstheorie. Vahlen. München, 1990 (WiSt-Taschenbücher).
- Marx, Steffen; Schlaich, Jörg (2009):** Gestalten von Eisenbahnbrücken. In: Stahlbau, Jg. 78, H. 3, S. 197–202.
- MBO:** Musterbauordnung – MBO, vom November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom Oktober 2008
- Meyer, Patrick; Roubens, Marc (2005):** Choice, Ranking and Sorting in Fuzzy Multiple Criteria Decision Aid. In: Figueira, Jose (Hg.): Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys: Springer New York (International Series in Operations Research & Management Science), Bd. 78, S. 471–503.
- Munda, Giuseppe (1995):** Multicriteria evaluation in a fuzzy environment - Theory and applications in ecological economics. Physica-Verl. Heidelberg, 1995 (Contributions to economics).
- Müssigbrodt, Matthias (2009):** Realloptionen in der Immobilienbewertung: Theoretische Analyse und Darstellung anhand praktischer Beispiele. VDM Verlag Dr. Müller. 2009.
- Nakicenovic, Nebojsa; Swart, Rob (Hg.) (2000):** Special Report on Emissions Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPPC). Online verfügbar unter <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm>, zuletzt geprüft am 15.07.2010.
- Niepel, Thomas (1995):** Effektivität und Effizienz von Beratung zur Wohnungsanpassung. 1995.
- Norris, Gregory A.; Marshall, Harold E. (1995):** Multiattribute Decision Analysis Method for Evaluating Buildings and Building Systems. Herausgegeben vom U.S. Department of Commerce. National Institute of Standards and Technology (NIST) Gaithersburg, 1995 (NISTIR, 5663).
- Ott, Konrad; Döring, Ralf (2008):** Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit. 2., überarb. und erw. Aufl., Metropolis-Verl. Marburg, 2008 (Beiträge zur Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit, Bd. 1).
- Peters, Malte L.; Zelewski, Stephan (2007):** TOPSIS als Technik zur Effizienzanalyse. In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium, Jg. 36, H. 1, S. 9–15.
- Plagaro Cowee, Natalie; Schwehr, Peter (2008):** Die Typologie der Flexibilität im Hochbau. Interact. Luzern, 2008 (Hochschule Luzern - Technik & Architektur, Kompetenzzentrum Typologie & Planung in Architektur (CCTP), 1).

- Radke, Volker (1999):** Nachhaltige Entwicklung - Konzept und Indikatoren aus wirtschaftstheoretischer Sicht. Fernuniv., Habil.-Schr.--Hagen. Physica-Verl. Heidelberg, 1999 (Umwelt und Ökonomie, 30).
- Rat der Europäischen Union (2006):** Die neue EU-Strategie für Nachhaltige Entwicklung. Rat der Europäischen Union. Brüssel, 2006.
- Renner, Alexander (2008):** Energie- und Ökoeffizienz von Wohngebäuden - Entwicklung eines Verfahrens zur lebenszyklusorientierten Bewertung der Umweltwirkungen unter besonderer Berücksichtigung der Nutzungsphase. Darmstadt, 2008 (Dissertation / Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 14).
- Riegel, Gert Wolfgang (2004):** Ein softwaregestütztes Berechnungsverfahren zur Prognose und Beurteilung der Nutzungskosten von Bürogebäuden. Darmstadt, 2004 (Dissertation / Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 8).
- Rommelfanger, Heinrich (2006):** Fuzzy-Nutzwertanalyse und Fuzzy-AHP. In: Morlock, Martin; Schwindt, Christoph; Trautmann, Norbert; Zimmermann, Jürgen (Hg.): Perspectives on Operations Research. Essays in Honor of Klaus Neumann. Deutscher Universitäts-Verlag/GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, S. 403–424.
- Rotermund, Uwe (Hg.) (2009):** FM Benchmarking Bericht 2009 - Vergleichen Sie Ihre Immobilien-Kennzahlen. In Zusammenarbeit mit GEFMA e.V. Unter Mitarbeit von Martin Weischer. Höxter, 2009.
- Saaty, Thomas L. (1980):** The analytic hierarchy process - Planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill International Book Co. New York, London, 1980.
- Schader-Stiftung (o.J.):** Prognosen der Wohnraumnachfrage bis 2030 in Ost und West. Online verfügbar unter [http://www.schader-stiftung.de/wohn\\_wandel/851.php](http://www.schader-stiftung.de/wohn_wandel/851.php), zuletzt geprüft am 25.02.2010.
- Schießl, Peter; Mayer, Till Felix (2009):** Lebensdauermanagement von Stahlbetonbauwerken. In: Beton- und Stahlbetonbau, Jg. 104, H. 11, S. 747–753.
- Schneeweiß, Christoph (1992):** Planung - Band 1: Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. 2 Bände. Springer. Berlin, 1992.
- Schulte-Zurhausen, Manfred (2002):** Organisation. 3., überarb. Aufl., Vahlen. München, 2002.
- Seising, Rudolf (2005):** Die Fuzzifizierung der Systeme - Die Entstehung der Fuzzy Set Theorie und ihrer ersten Anwendungen - ihre Entwicklung bis in die 70er Jahre des 20. Jahrhunderts. Steiner. Stuttgart, 2005 (Boethius, 54).
- Sinn, Hans-Werner (1980):** Ökonomische Entscheidungen bei Ungewißheit. Univ., Diss.--Mannheim, 1977. Mohr. Tübingen, 1980 (Die Einheit der Gesellschaftswissenschaften, 28).
- sirAdos (o.J.):** LEGEP - Lebenszyklus Gebäude Planung. Kissing, sirAdos.
- Sobanjo, J. O. (1999):** Facility Life-Cycle Cost Analysis based on Fuzzy Sets Theory - Life-cycle cost analysis. In: Durability of Building Materials and Components, Jg. 8, S. 1798–1809.



- Spiegel (2008):** Umwelt: Kitt für das Klima - SPIEGEL ONLINE - Nachrichten - Wissenschaft. Online verfügbar unter <http://www.spiegel.de/spiegel/0,1518,574196,00.html>, zuletzt geprüft am 30.09.2009.
- SRU (1994):** Umweltgutachten - Unterrichtung durch die Bundesregierung; Umweltgutachten des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen. Kohlhammer. Stuttgart, 1994 (Deutscher Bundestag, Wahlperiode - Drucksache).
- Statistisches Bundesamt (2006):** Verwendung bestimmter ozonschichtschädigender und klimawirksamer Stoffe 2004. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, 2006 (Umwelt).
- Statistisches Bundesamt (2008):** Nachhaltige Entwicklung in Deutschland - Indikatorenbericht 2008. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, 2008.
- Statistisches Bundesamt (2009a):** Bevölkerung Deutschlands bis 2060 - 12. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, 2009.
- Statistisches Bundesamt (2009b):** Haushalte und Familien - Ergebnisse des Mikrozensus 2008. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, 2009 (Fachserie 1 Reihe 3).
- Statistisches Bundesamt (2009c):** Umweltnutzung und Wirtschaft, Tabellenband zu den umweltökonomischen Gesamtrechnungen - Teil 4: Wassereinsatz, Abwasser, Abfall, Flächennutzung, Umweltschutzmaßnahmen. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, 2009.
- Statistisches Bundesamt (2009d):** Statistisches Jahrbuch 2009. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, 2009.
- Statistisches Bundesamt (2010):** Gesundheit. Todesursachen in Deutschland 2009. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, 2009 (Fachserie 12 Reihe 4).
- Streit, Bruno (1994):** Lexikon Ökotoxikologie. 2., aktualis. u. erw. Aufl., VCH. Weinheim, 1994.
- Tzscheuschler, Peter; Nickel, Michael; Wernicke, Ingrid; Buttermann, Hans Georg (2009):** Energieverbrauch in Deutschland - Stand 2007: Daten, Fakten, Kommentare. In: BWK das Energie-Fachmagazin, Jg. 61, H. 6, S. 6–14.
- UBA, Innenraumlufthygienekommission des Umweltbundesamtes (2002):** Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen („Schimmelpilz-Leitfaden“). Berlin, 2002.
- UBA, Umweltbundesamt (2007):** Ökonomische Bewertung von Umweltschäden - Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten. Herausgegeben vom Umweltbundesamt. Dessau, 2007.
- UNESCO (2001):** Allgemeine Erklärung zur kulturellen Vielfalt. Verabschiedet von der 31. UNESCO-Generalkonferenz im November 2001 in Paris. Online verfügbar unter <http://www.unesco.de/443.html>, zuletzt geprüft am 29.07.2010.
- USGBC (2010):** LEED. U.S. Green Building Council. Online verfügbar unter <http://www.usgbc.org/>, zuletzt geprüft am 28.09.2010.
- van Oers, L.; Koning, A. de; Guinée, Jeroen B., et al. (Hg.) (2002):** Abiotic Resource Depletion in LCA. Road and Hydraulic Engineering Institute, 2002.

- VDI 4100 (2010-05):** Schallschutz im Hochbau - Wohnungen - Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz.
- VDI 6022 Blatt 1 (2006-04):** Hygiene – Anforderungen an Raumluftechnische Anlagen und Geräte.
- VDI 6024 Blatt 1 (2008-09):** Wassersparen in Trinkwasser-Installationen; Anforderungen an Planung, Ausführung, Betrieb und Instandhaltung.
- Vogdt, Frank U. (Hg.) (2002):** Dialog Bauqualität. Endbericht im Auftrag des Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2002.
- Walletschek, Hartwig (1995):** Öko-Lexikon - Stichworte und Zusammenhänge. Beck. München, 1995 (Beck'sche Reihe, 344).
- WMO, World Meteorological Organization (2007):** Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006 - Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 50 Genf, 2007.
- Worch, Barbara (1996):** Die Anwendung der Kosten-Nutzen-Analyse im Umweltbereich. Univ., Diss.--Bremen, 1996. DDD Dr. und Verl. Darmstadt, 1996 (Ökologische Reihe, 1).
- Zangemeister, Christof (1976):** Nutzwertanalyse in der Systemtechnik - Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. Univ., Diss.--Berlin, 1970. 4. Aufl., Zangemeister. Hamburg, 1976.
- Zurek, Monika B.; Henrichs, Thomas (2007):** Linking scenarios across geographical scales in international environmental assessments. In: Technological Forecasting and Social Change, Jg. 74, S. 1282–1295.



# Anhang

## Anhang A      HGF-Ansatz mit Defizitanalyse für das Aktivitätsfeld Wohnen und Bauen

*Tabelle A-1:      Zielsystem, zugehörige Regeln und Problemfelder von besonderer Bedeutung [eigene Darstellung nach Coenen & Grunwald (2003) und Jörissen et al. (2005)]*

<b>1</b>	<b>Sicherung der menschlichen Existenz</b>	<b>2</b>	<b>Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivkapitals</b>	<b>3</b>	<b>Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten</b>
<b>1.1</b>	<b>Schutz der menschlichen Gesundheit</b>  Gefahren und unvertretbare Risiken für die menschliche Gesundheit durch anthropogen bedingte Umweltbelastungen sind zu vermeiden.  Innenraumbelastung und Lärm	<b>2.1</b>	<b>Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen</b>  Die Nutzungsrate sich erneuernder Ressourcen darf deren Regenerationsrate nicht überschreiten sowie die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des jeweiligen Ökosystems nicht gefährden.  Flächeninanspruchnahme und Oberflächenversiegelung (Verlust von natürlicher Bodenfunktion und Freiräumen), Wasserverbrauch und Regenwassernutzung	<b>3.1</b>	<b>Chancengleichheit im Hinblick auf Bildung, Beruf, Information</b> Alle Mitglieder einer Gesellschaft müssen gleichwertige Chancen in Bezug auf den Zugang zu Bildung, Information, beruflicher Tätigkeit, Ämtern und sozialen politischen und ökonomischen Positionen haben.  benachteiligende Effekte sozial schwacher Quartiere (nur zum Teil städtebaulich beeinflussbar)

<p><b>1.2 Gewährleistung der Grundversorgung</b></p> <p>Für alle Mitglieder der Gesellschaft muss ein Mindestmaß an Grundversorgung (Wohnung, Ernährung, Kleidung, Gesundheit) sowie an Absicherung gegen zentrale Lebensrisiken (Krankheit, Invalidität) gewährleistet sein.</p> <p>zumutbare, gesunde, sichere Wohnverhältnisse, Wohnungslosigkeit, Wohnraumversorgung, Chancengleichheit am Wohnungsmarkt</p>	<p><b>2.2 Nachhaltige Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen</b></p> <p>Die Reichweite der nachgewiesenen nicht erneuerbaren Ressourcen ist über die Zeit zu erhalten.</p> <p>Verbrauch nicht erneuerbarer Energie, Entnahme mineralischer Rohstoffe</p>	<p><b>3.2 Partizipation an gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen</b></p> <p>Allen Mitgliedern einer Gesellschaft muss die Teilhabe an den gesellschaftlich relevanten Entscheidungsprozessen möglich sein.</p> <p>Öffentlichkeitsbeteiligung bei v.a. kommunalen Entscheidungen</p>
<p><b>1.3 Selbstständige Existenzsicherung</b></p> <p>Für alle Gesellschaftsmitglieder ist die Möglichkeit einer Existenzsicherung (einschließlich Kindererziehung und Altersversorgung) durch frei übernommene Tätigkeit zu gewährleisten.</p> <p>Bausektor als Arbeitsmarkt, nachlassende Neubautätigkeit, verstärkte Ausbautätigkeit, verstärkte Mischung von Wohnen u. Arbeiten durch Umbrüche der Arbeitsverhältnisse</p>	<p><b>2.3 Nachhaltige Nutzung der Umwelt als Senke</b></p> <p>Die Freisetzung von Stoffen darf die Aufnahmefähigkeit der Umweltmedien und Ökosysteme nicht überschreiten.</p> <p>Treibhausgas-Emissionen, Photosmog, Versauerung, Ozonabbauende Schadstoffe, Erdaushub, Bauschutt, Baustellenabfälle, Verunreinigung durch Problemstoffe</p>	<p><b>3.3 Erhaltung des kulturellen Erbes und der kulturellen Vielfalt</b></p> <p>Das kulturelle Erbe der Menschheit und die kulturelle Vielfalt sind zu erhalten.</p> <p>Bauliches Kulturerbe, Denkmalschutz, Uniformierung der Innenstädte, multikulturelles Zusammenleben</p>

<p>1.4 <b>Gerechte Verteilung der Umweltnutzungsmöglichkeiten</b></p> <p>Die Nutzung der Umwelt ist nach Prinzipien der Gerechtigkeit unter fairer Beteiligung aller Betroffenen zu verteilen.</p> <p>Zugang zu Energieressourcen (global), Verteilung von Emissionsrechten (global)</p>	<p>2.4 <b>Vermeidung unvermeidbarer technischer Risiken</b></p> <p>Technische Risiken mit möglicherweise katastrophalen Auswirkungen für Mensch und Umwelt sind zu vermeiden.</p> <p>Hochwasserschäden</p>	<p>3.4 <b>Erhaltung der kulturellen Funktion der Natur</b></p> <p>Kultur- und Naturlandschaften bzw. Landschaftsteile von besonderer charakteristischer Eigenart und Schönheit sind zu erhalten.</p> <p>verstädterte Landschaften</p>
<p>1.5 <b>Ausgleich extremer Einkommens- und Vermögensverhältnisse</b></p> <p>Extreme Unterschiede in der Einkommens- und Vermögensverteilung sind abzubauen.</p> <p>Wohneigentum, Mietrecht, Wohnungsversorgung</p>	<p>2.5 <b>Nachhaltige Entwicklung des Sach-, Human- und Wissenskapitals</b></p> <p>Das Sach-, Human- und Wissenskapital ist so zu entwickeln, dass die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit erhalten bzw. verbessert werden kann.</p> <p>fortlaufende Anpassung des in Bauwerken verkörperten Sachkapitals</p>	<p>3.5 <b>Erhaltung der sozialen Ressourcen</b></p> <p>Um den sozialen Zusammenhalt der Gesellschaft zu gewährleisten, sind Rechts- und Gerechtigkeitssinn, Toleranz, Solidarität und Gemeinwohlorientierung sowie Potenziale der gewaltfreien Konfliktregelung zu stärken.</p> <p>Desintegration der Stadtgesellschaft und Segregation, Entwertung öffentlichen Raums</p>

## Anhang B Steckbriefe des BNB-Systems

Tabelle B- 1: Steckbriefe des BNB-Systems [nach BMVBS (2010)]

<u>Ökologische Qualität</u>	
Wirkungen auf die globale Umwelt	1.1.1 Treibhauspotenzial
	1.1.2 Ozonschichtzerstörungspotential
	1.1.3 Ozonbildungspotential
	1.1.4 Versauerungspotential
	1.1.5 Überdüngungspotential
	1.1.6 Risiken für die lokale Umwelt
	1.1.7 Nachhaltige Materialgewinnung /Holz
Ressourceninanspruchnahme	1.2.1 Primärenergiebedarf nicht erneuerbar
	1.2.2 Gesamtprimärenergiebedarf und Anteil erneuerbarer Primärenergie
	1.2.3 Trinkwasserverbrauch und Abwasseraufkommen
	1.2.4 Flächeninanspruchnahme
<u>Ökonomische Qualität</u>	
Lebenszykluskosten	2.1.1 Gebäudebezogenen Kosten im Lebenszyklus
Wertentwicklung	2.2.1 Drittverwendungsfähigkeit
<u>Soziokulturelle und funktionale Qualität</u>	
Gesundheit, Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit	3.1.1 Thermischer Komfort im Winter
	3.1.2 Thermischer Komfort im Sommer
	3.1.3 Innenraumluftthygiene
	3.1.4 Akustischer Komfort
	3.1.5 Visueller Komfort
	3.1.6 Einflussnahme des Nutzers
	3.1.7 Aufenthaltsmerkmale im Außenraum
	3.1.8 Sicherheit und Störfallrisiken
Funktionalität	3.2.1 Barrierefreiheit
	3.2.2 Flächeneffizienz
	3.2.3 Umnutzungsfähigkeit
	3.2.4 Zugänglichkeit
	3.2.5 Fahrradkomfort
Sicherung der Gestaltungsqualität	3.3.1 Planungswettbewerb
	3.3.1 Kunst am Bau

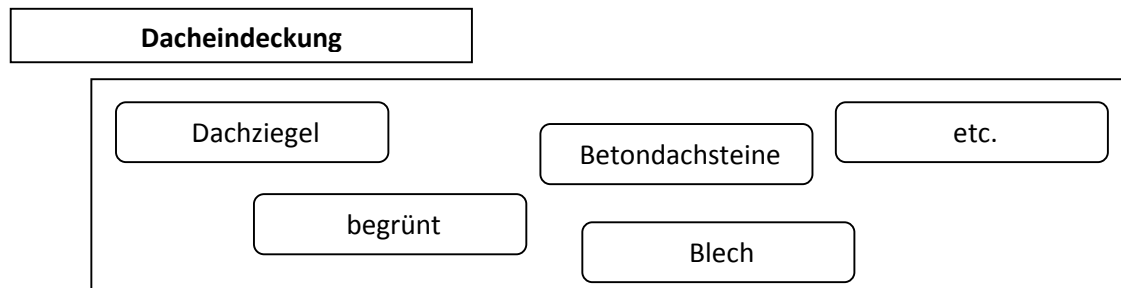


Fortsetzung von Tabelle B- 1

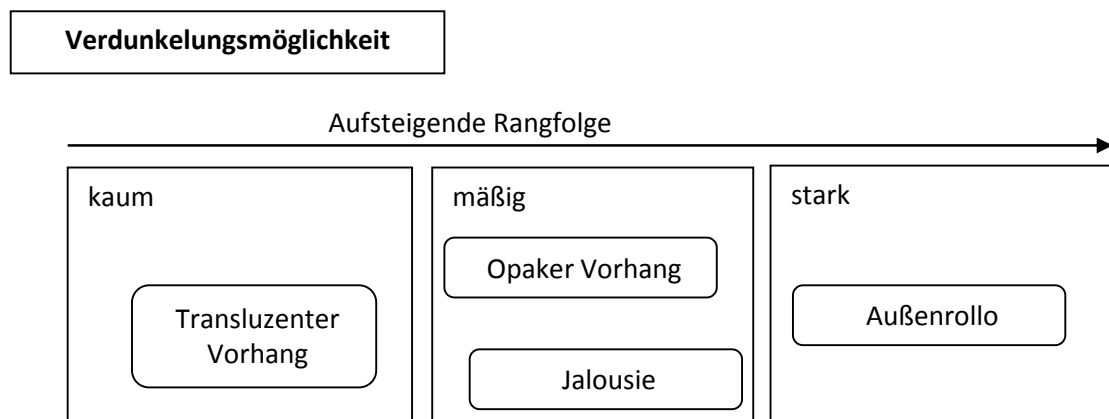
<u>Technische Qualität</u>	
Qualität der technischen Ausführung	4.1.1 Schallschutz
	4.1.2 Wärme- und Tauwasserschutz
	4.1.3 Reinigung und Instandhaltung
<u>Prozessqualität</u>	
Qualität der Planung	5.1.1 Projektvorbereitung
	5.1.2 Integrale Planung
	5.1.3 Optimierung und Komplexität der Planung
	5.1.4 Ausschreibung und Vergabe
	5.1.5 Voraussetzungen für eine optimale Bewirtschaftung
Qualität der Bauausführung	5.2.1 Baustelle/Bauprozess
	5.2.2 Präqualifikation der ausführenden Firmen
	5.2.3 Qualitätssicherung der Bauausführung
	5.2.4 Systematische Inbetriebnahme
<u>Standortmerkmale</u>	
Standortmerkmale	6.1.1 Risiken am Mikrostandort
	6.1.2 Verhältnisse am Mikrostandort
	6.1.3 Quartiersmerkmale
	6.1.4 Verkehrsanbindung
	6.1.5 Nähe zu nutzungsrelevanten Einrichtungen
	6.1.6 Anliegende Medien/Erschließung

## Anhang C Beispiele zu nominalen, ordinalen und kardinalen Merkmalen

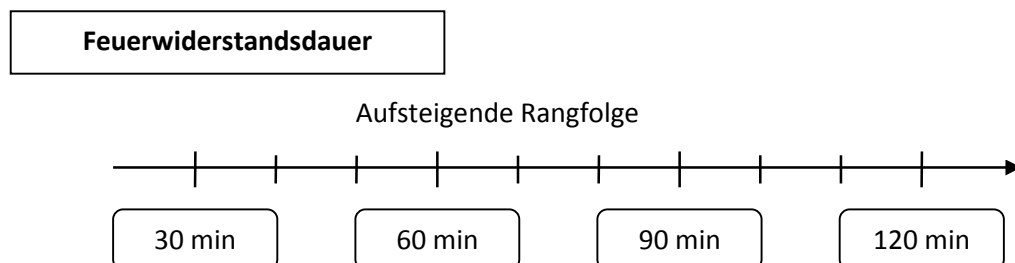
Bei **nominalen Merkmalen** kann lediglich festgestellt werden, ob eine bestimmte Ausprägung vorhanden ist, z.B. begrünt oder nicht. Es gibt jedoch keine Rangfolge.



Bei **ordinalen Merkmalen** ist eine natürliche Rangfolge gegeben. Merkmale können in Klassen eingeordnet werden. Es kann eine Mindestanforderung gestellt werden, z.B. ein Präsentationsraum soll mindestens eine mäßige Verdunkelungsmöglichkeit bieten. Es kann jedoch keine Aussage zum Abstand zweier Klassen gemacht werden.



Bei **kardinalen Merkmalen** ist wie bei ordinalen Merkmalen eine Rangfolge gegeben. Zusätzlich ist der Abstand zwischen zwei Klassen quantifizierbar. Z.B. ist der Abstand zwischen 30 min Feuerwiderstandsdauer und 90 min Feuerwiderstandsdauer doppelt so groß wie zwischen 90 min und 120 min.



## Anhang D Zahlenbeispiele zu Entscheidungsregeln unter Ungewissheit

Gegeben ist die unten dargestellte 3x4-Entscheidungsmatrix für die Varianten  $V_1$  bis  $V_3$  in den Szenarien  $S_1$  bis  $S_4$ . Der im jeweiligen Szenario größte Nutzwert wurde hervorgehoben.

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
$V_1$	0,1	0,2	0,6	0,6
$V_2$	0,3	<b>0,4</b>	0,6	0,7
$V_3$	<b>0,9</b>	0,0	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>

### Dominanz-Regel:

$V_1$  wird von  $V_2$  dominiert, da  $V_2$  in Szenario  $S_3$  ein gleich großes Ergebnis erzielt und in den übrigen Szenarien ein besseres.  $V_1$  ist also nicht effizient. Die beiden anderen Varianten sind hingegen effizient, wie sich im Vergleich der Szenarien  $S_1$  und  $S_2$  sofort zeigt.

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
$V_1 < V_2$	0,1<0,3	0,2<0,4	0,6≤0,6	0,6<0,7

### Maximin-Regel:

Nach der Maximin-Regel wird  $V_2$  bevorzugt. Der kleinste Nutzwert über alle Szenarien (Zeilenminimum) beträgt hier 0,3, während er bei den beiden anderen Varianten kleiner ist. Im ungünstigsten Fall schneidet  $V_2$  am besten ab, daher spricht man auch vom Prinzip der Schadensminimierung.

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	Zeilenminimum
$V_1$	<b>0,1</b>	0,2	0,6	0,6	0,1
$V_2$	<b>0,3</b>	0,4	0,6	0,7	<b>0,3</b>
$V_3$	0,9	<b>0,0</b>	0,7	0,8	0,0

### Maximax-Regel:

Nach der Maximax-Regel wird  $V_3$  bevorzugt, weil die Variante über alle Szenarien mit einem Wert von 0,9 den größten Nutzwert erzielt.

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	Zeilenmaximum
$V_1$	0,1	0,2	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	0,6
$V_2$	0,3	0,4	0,6	<b>0,7</b>	0,7
$V_3$	<b>0,9</b>	0,0	0,7	0,8	<b>0,9</b>

### Hurwicz-Regel:

Nach der Hurwicz-Regel wird ein gewichtetes Mittel zwischen dem Zeilenminimum und dem Zeilenmaximum gebildet. Für  $\alpha = 0,6$  herrscht z.B. gerade Indifferenz zwischen  $V_2$  und  $V_3$ .

	Zeilenminimum	Zeilenmaximum	Wichtung mit $\alpha = 0,6$
$V_1$	0,1	0,6	$(1-0,6) \cdot 0,1 + 0,6 \cdot 0,6 = 0,40$
$V_2$	0,3	0,7	$(1-0,6) \cdot 0,3 + 0,6 \cdot 0,7 = \mathbf{0,54}$
$V_3$	0,0	0,9	$(1-0,6) \cdot 0,0 + 0,6 \cdot 0,9 = \mathbf{0,54}$

### Savage-Niehans-Regel:

Zunächst ist die Regret-Matrix zu bilden, die die Differenz zwischen dem größten Nutzwert über alle Varianten eines Szenarios und dem erzielten Nutzwert enthält. Der Wert kann als das Bedauern aufgefasst werden, nicht die beste Variante gewählt zu haben. Tritt Szenario  $S_1$  ein, so ist z.B. das Bedauern bei Varianten  $V_1$  mit einem entgangenen Nutzwert von 0,8 gegenüber der Variante  $V_3$  besonders groß. Zu bevorzugen wäre  $V_3$ , weil ihr größter Regret-Wert bezüglich aller Szenarien mit 0,4 am geringsten ist.

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	Zeilenmaximum
$V_1$	$0,9-0,1=\mathbf{0,8}$	$0,4-0,2=0,2$	$0,7-0,6=0,1$	$0,8-0,6=0,2$	0,8
$V_2$	$0,9-0,3=\mathbf{0,6}$	0,0	$0,7-0,6=0,1$	$0,8-0,7=0,1$	0,6
$V_3$	0,0	$0,4-0,0=\mathbf{0,4}$	0,0	0,0	<b>0,4</b>

### Laplace-Regel:

Nach der Laplace-Regel ist die Summe des Nutzwerts über alle Szenarien zu maximieren. Hier wäre  $V_3$  zu bevorzugen.

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	Zeilensumme
$V_1$	0,1	0,2	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	1,5
$V_2$	0,3	0,4	0,6	<b>0,7</b>	2,0
$V_3$	<b>0,9</b>	0,0	0,7	0,8	<b>2,4</b>

### Bayes-Regel:

Für die Anwendung der Bayes-Regel müssen die Eintrittswahrscheinlichkeiten  $p$  für die Szenarien bekannt sein, so dass der Erwartungswert bestimmt werden kann, z.B.:

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	
$p$	10%	20%	30%	40%	
					Erwartungswert
$V_1$	0,1	0,2	0,6	0,6	0,47
$V_2$	0,3	0,4	0,6	0,7	0,57
$V_3$	0,9	0,0	0,7	0,8	<b>0,62</b>

Hier ergäbe sich  $V_3$  als Vorzugsvariante mit dem Erwartungswert

$$0,9 \cdot 10 \% + 0,0 \cdot 20 \% + 0,7 \cdot 30 \% + 0,8 \cdot 40 \% = 0,62$$

### Hodges-Lehmann-Regel:

Nach dieser Regel wird ein gewichtetes Mittel zwischen dem Erwartungswert und dem Zeilenminimum gebildet. Wählt man den Faktor z.B. zu 0,2, so wird  $V_2$  bevorzugt.

	Zeilenminimum	Erwartungswert	Wichtung mit $\lambda = 0,2$
$V_1$	0,1	0,47	$(1-0,2) \cdot 0,1 + 0,2 \cdot 0,47 = 0,17$
$V_2$	0,3	0,57	$(1-0,2) \cdot 0,3 + 0,2 \cdot 0,57 = \mathbf{0,35}$
$V_3$	0,0	0,62	$(1-0,2) \cdot 0,0 + 0,2 \cdot 0,62 = 0,12$

## Anhang E Bestimmung von Gewichtungsfaktoren nach der AHP-Methode

Im folgenden Beispiel wird das Vorgehen anhand der Kriterien Treibhauspotential (GWP), Ozonabbaupotential (ODP), Versauerungspotential (AP), Eutrophierungspotential (EP) und Bodennahe Ozonbildung (POCP) erläutert. Diese sind gegeneinander zu wichten.

Es sind fünf Kriterien jeweils paarweise zu vergleichen. Das heißt, es sind  $\frac{n \cdot (n-1)}{2} = \frac{5 \cdot 4}{2} = 10$  Vergleiche durchzuführen.

Die Bewertung erfolgt in Zahlen von 1 bis 9 nach Tabelle 3-2. Dabei bedeutet 1, dass beide Kriterien dieselbe Bedeutung für das Nachhaltigkeitsziel haben, und 9, dass zwischen den beiden Kriterien der größtmögliche Bedeutungsunterschied besteht.

Tabelle E-1: Neun-Punkte-Skala [nach Götze & Bloech (2002, S. 190)]

Skalenwert	Definition	Interpretation
1	Gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element.
3	Etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	Erheblich größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
7	Sehr viel größere Bedeutung	Die sehr viel größere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.
9	Absolut dominierend	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte	

Das Bauen hat einen wesentlichen Beitrag zum Treibhauspotential, der Beitrag zum Ozonabbaupotential ist eher gering, und der Beitrag zu den übrigen Wirkungskategorien erfolgt hauptsächlich über die Vorketten. Es wird eingeschätzt, dass die Bedeutung von AP, EP und POCP jeweils gleich groß ist, GWP eine besonders große Bedeutung besitzt und ODP eine eher geringe Bedeutung. Im Einzelnen lauten die paarweisen Vergleiche:

GWP gegenüber ODP: erheblich größer (5)

GWP gegenüber AP: etwas größer (3)

GWP gegenüber EP: etwas größer (3)

GWP gegenüber POCP: etwas größer (3)

ODP gegenüber AP: etwas kleiner ( $\frac{1}{3}$ )

ODP gegenüber EP: etwas kleiner ( $\frac{1}{3}$ )

ODP gegenüber POCP: etwas kleiner ( $\frac{1}{3}$ )

AP gegenüber EP: gleich groß (1)

AP gegenüber POCP: gleich groß (1)

EP gegenüber POCP: gleich groß (1)

Damit ergibt sich die Vergleichsmatrix M aus Abbildung D-1. Auf der Hauptdiagonalen findet sich immer der Wert 1, da die Bedeutung eines Elements gegenüber sich selbst gleich groß sein muss. Der Bereich oberhalb der Hauptdiagonale wird mit den Zahlenwerten aus den Vergleichen gefüllt, unterhalb der Hauptdiagonale werden deren Kehrwerte ergänzt.

	GWP	ODP	AP	EP	POCP
GWP	1	5	3	3	3
ODP	0,2	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
AP	$\frac{1}{3}$	3	1	1	1
EP	$\frac{1}{3}$	3	1	1	1
POCP	$\frac{1}{3}$	3	1	1	1

Abbildung D-1: Matrix M der paarweisen Vergleiche

Zur Bestimmung der Gewichte wird der Eigenvektor zum größten Eigenwert dieser Matrix benötigt. Der normalisierte Eigenvektor, der durch einen Betrag von 1 gekennzeichnet ist, entspricht den Gewichten. Eigenvektoren  $x$  sowie zugehörige Eigenwerte  $\lambda$  zur Matrix M sind definiert durch

$$(M - \lambda \cdot E) \cdot x = 0 \quad \text{Gl. 8-1}$$

mit E Einheitsmatrix

Das Eigenwertproblem lässt sich für größere Matrizen in der Regel nur numerisch lösen<sup>45</sup>. Für das Beispiel ergibt sich als Näherung der normalisierte Eigenvektor zu  $x = (0,444; 0,063; 0,165; 0,165; 0,165)^T$  mit dem Eigenwert  $\lambda = 5,04$ . Dass diese Lösung Gl. 8-1 bis auf die dritte Kommastelle erfüllt, kann leicht nachvollzogen werden:

-4,04	5	3	3	3
0,2	-4,04	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
$\frac{1}{3}$	3	-4,04	1	1
$\frac{1}{3}$	3	1	-4,04	1
$\frac{1}{3}$	3	1	1	-4,04

 $*$ 

0,444
0,063
0,165
0,165
0,165

 $=$ 

0,0062
-0,0007
0,0004
0,0004
0,0004

Die Gewichte ergeben sich damit zu:

GWP: 44,4%

ODP: 6,3%

AP: 16,5%

EP: 16,5%

POCP: 16,5%

Die Summe der Gewichte beträgt im vorliegenden Beispiel rundungsbedingt 100,2%.

Schließlich soll noch die Konsistenz der abgegebenen Vergleiche mit Hilfe des Inkonsistenzfaktors nach Saaty [Saaty (1980)] bestimmt werden. Ein Inkonsistenzfaktor von 0 steht dabei für eine Bewertungsmatrix ohne Widersprüche. Bei einem Inkonsistenzfaktor von 0,1 sind kaum Widersprüche erkennbar, bis 0,2 sind diese noch akzeptabel. Ein Inkonsistenzfaktor von 1 spricht für willkürliche (zufällige) Wertungen.

Der Inkonsistenzfaktor CR (Consistency Ratio) ist das Verhältnis sich aus dem Inkonsistenzindex CI (Consistency Index) der Matrix und dem Inkonsistenzindex RCI (Random Consistency Index) von Zufallsmatrizen.

$$CR = CI/RCI$$

Gl. 8-2

<sup>45</sup> Auf eine Darstellung sei an dieser Stelle verzichtet. Das Eigenwertproblem kann mit gängigen Mathematik-Programmen wie z.B. Matlab oder mit einfachen Näherungsalgorithmen in Tabellenkalkulationsprogrammen wie z.B. Excel gelöst werden.



Dabei ist CI definiert als:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad \text{Gl. 8-3}$$

mit  $\lambda$  erster Eigenwert der Matrix

$n$  Größe der quadratischen  $n \times n$ -Matrix

RCI kann aus folgender Tabelle abgelesen werden:

Tabelle E-2: RCI für  $n \times n$ -Matrizen bis  $n=10$  [nach Saaty (1980)]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RCI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Für das vorliegende Beispiel ergibt sich

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{5,04 - 5}{5 - 1} = 0,01$$

$$RCI = 1,12$$

$$CR = CI/RCI = 0,01/1,12 = 0,009$$

Der Inkonsistenzfaktor ist deutlich kleiner als 0,1. Die Konsistenz der abgegebenen Vergleiche kann als sehr gut eingestuft werden.

Enthielte die Matrix schwere Widersprüche, so wäre der Inkonsistenzfaktor größer. Ändert man im obigen Beispiel die Bewertung von ODP gegenüber AP dahin, dass ODP bedeutend wichtiger als AP sei (Skalenwert 5 statt  $\frac{1}{3}$ ) und belässt alle anderen Bewertungen, so ergibt sich ein Inkonsistenzfaktor von 0,21. Die logischen Widersprüche einer solchen Bewertung sind offensichtlich: Es wird z.B. angegeben, ODP sei viel bedeutender als AP und etwas unbedeutender als EP. Gleichzeitig seien AP und EP gleichbedeutend, also  $EP \succ ODP \succ AP$  und  $EP \sim AP$ . Diese und weitere widersprüchliche Bewertungen schlagen sich im hohen Inkonsistenzfaktor von 0,21 nieder.

## Anhang F Nutzwertanalysen für das Beispielgebäude in allen Szenarien

Tabelle F- 1: Nutzwertanalyse für die Varianten im Szenario 0 (Referenz)

Kriterium	Bewertungs- größe	normiert auf Referenzwert [-]	Einzel- nutzwert [-]	Gewich- tung	Gesamt- nutzwert [-]
1	2	3	4	5	6
Herkömmliche Tragstruktur: Szenario 0					
GWP	6,87	1,00	0,50	15%	0,50
ODP	2,38E-07	1,00	0,50	5%	
AP	0,0276	1,00	0,50	5%	
EP	0,00303	1,00	0,50	5%	
POCP	0,00202	1,00	0,50	5%	
PE n.e.	81,0	1,00	0,50	15%	
LCC	30,0	1,00	0,50	50%	
Flexible Tragstruktur (a): Szenario 0					
GWP	7,41	1,08	0,37	15%	0,39
ODP	2,79E-07	1,17	0,22	5%	
AP	0,0280	1,02	0,47	5%	
EP	0,00309	1,02	0,47	5%	
POCP	0,00205	1,02	0,47	5%	
PE n.e.	93,5	1,15	0,24	15%	
LCC	31,2	1,04	0,43	50%	
Flexible Tragstruktur (b): Szenario 0					
GWP	6,70	0,97	0,54	15%	0,49
ODP	2,54E-07	1,07	0,39	5%	
AP	0,0273	0,99	0,52	5%	
EP	0,00296	0,98	0,54	5%	
POCP	0,00199	0,99	0,52	5%	
PE n.e.	80,3	0,99	0,51	15%	
LCC	30,7	1,02	0,46	50%	
Legende:					
GWP:	Treibhauspotential [kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
ODP:	Ozonabbaupotential [kg R <sub>11</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
AP:	Versauerungspotential [kg SO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
EP:	Eutrophierungspotential [kg PO <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
POCP:	Bodennahe Ozonbildung [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
PE n.e.:	nicht erneuerbare Primärenergie [MJ/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
LCC:	Lebenszykluskosten [€/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				

## Anhang F - Nutzwertanalysen für das Beispielgebäude in allen Szenarien

Tabelle F- 2: Nutzwertanalyse für die Varianten im Szenario 1 (Langfristig gleichbleibende Nutzung)

Kriterium	Bewertungs- größe	normiert auf Referenzwert [-]	Einzel- nutzwert [-]	Gewich- tung	Gesamt- nutzwert [-]
1	2	3	4	5	6
Herkömmliche Tragstruktur: Szenario 1					
GWP	4,77	0,69	1,00	15%	0,80
ODP	1,65E-07	0,69	1,00	5%	
AP	0,0210	0,76	0,90	5%	
EP	0,00223	0,74	0,94	5%	
POCP	0,00144	0,71	0,98	5%	
PE n.e.	60,3	0,74	0,93	15%	
LCC	27,4	0,91	0,65	50%	
Flexible Tragstruktur (a): Szenario 1					
GWP	5,21	0,76	0,90	15%	0,72
ODP	1,92E-07	0,81	0,82	5%	
AP	0,0213	0,77	0,88	5%	
EP	0,00228	0,75	0,91	5%	
POCP	0,00146	0,72	0,97	5%	
PE n.e.	70,2	0,87	0,72	15%	
LCC	28,4	0,95	0,59	50%	
Flexible Tragstruktur (b): Szenario 1					
GWP	4,58	0,67	1,00	15%	0,80
ODP	1,71E-07	0,72	0,97	5%	
AP	0,0207	0,75	0,92	5%	
EP	0,00216	0,71	0,98	5%	
POCP	0,00140	0,69	1,00	5%	
PE n.e.	58,9	0,73	0,96	15%	
LCC	27,8	0,93	0,62	50%	
Legende:					
GWP:	Treibhauspotential [kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
ODP:	Ozonabbaupotential [kg R <sub>11</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
AP:	Versauerungspotential [kg SO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
EP:	Eutrophierungspotential [kg PO <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
POCP:	Bodennahe Ozonbildung [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
PE n.e.:	nicht erneuerbare Primärenergie [MJ/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
LCC:	Lebenszykluskosten [€/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				

## Anhang F - Nutzwertanalysen für das Beispielgebäude in allen Szenarien

Tabelle F- 3: Nutzwertanalyse für die Varianten im Szenario 2 (Steter Wandel der Arbeitswelt)

Kriterium	Bewertungs- größe	normiert auf Referenzwert [-]	Einzel- nutzwert [-]	Gewich- tung	Gesamt- nutzwert [-]
1	2	3	4	5	6
Herkömmliche Tragstruktur: Szenario 2					
GWP	5,28	0,77	0,89	15%	0,63
ODP	1,90E-07	0,80	0,84	5%	
AP	0,0226	0,82	0,80	5%	
EP	0,00244	0,81	0,82	5%	
POCP	0,00157	0,78	0,87	5%	
PE n.e.	68,1	0,84	0,76	15%	
LCC	31,1	1,04	0,44	50%	
Flexible Tragstruktur (a): Szenario 2					
GWP	5,64	0,82	0,80	15%	0,59
ODP	2,14E-07	0,90	0,67	5%	
AP	0,0227	0,82	0,79	5%	
EP	0,00247	0,81	0,81	5%	
POCP	0,00157	0,78	0,87	5%	
PE n.e.	77,2	0,95	0,58	15%	
LCC	30,8	1,03	0,45	50%	
Flexible Tragstruktur (b): Szenario 2					
GWP	4,97	0,72	0,96	15%	0,68
ODP	1,91E-07	0,80	0,83	5%	
AP	0,0220	0,80	0,84	5%	
EP	0,00234	0,77	0,88	5%	
POCP	0,00151	0,75	0,92	5%	
PE n.e.	65,1	0,80	0,83	15%	
LCC	30,3	1,01	0,49	50%	
Legende:					
GWP:	Treibhauspotential [kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
ODP:	Ozonabbaupotential [kg R <sub>11</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
AP:	Versauerungspotential [kg SO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
EP:	Eutrophierungspotential [kg PO <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
POCP:	Bodennahe Ozonbildung [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
PE n.e.:	nicht erneuerbare Primärenergie [MJ/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
LCC:	Lebenszykluskosten [€/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				

## Anhang F - Nutzwertanalysen für das Beispielgebäude in allen Szenarien

Tabelle F- 4: Nutzwertanalyse für die Varianten im Szenario 3 (Urbanisierung des Quartiers)

Kriterium	Bewertungs- größe	normiert auf Referenzwert [-]	Einzel- nutzwert [-]	Gewich- tung	Gesamt- nutzwert [-]
1	2	3	4	5	6
Herkömmliche Tragstruktur: Szenario 3					
GWP	5,73	0,83	0,78	15%	0,59
ODP	2,11E-07	0,89	0,69	5%	
AP	0,0198	0,72	0,97	5%	
EP	0,00228	0,75	0,91	5%	
POCP	0,00160	0,79	0,85	5%	
PE n.e.	66,9	0,83	0,79	15%	
LCC	32,2	1,07	0,38	50%	
Flexible Tragstruktur (a): Szenario 3					
GWP	4,97	0,72	0,96	15%	0,65
ODP	2,05E-07	0,86	0,73	5%	
AP	0,0213	0,77	0,88	5%	
EP	0,00221	0,73	0,95	5%	
POCP	0,00155	0,77	0,89	5%	
PE n.e.	70,2	0,87	0,72	15%	
LCC	30,7	1,02	0,46	50%	
Flexible Tragstruktur (b): Szenario 3					
GWP	4,40	0,64	1,00	15%	0,72
ODP	1,86E-07	0,78	0,87	5%	
AP	0,0207	0,75	0,92	5%	
EP	0,00209	0,69	1,00	5%	
POCP	0,00149	0,74	0,94	5%	
PE n.e.	60,2	0,74	0,93	15%	
LCC	30,2	1,01	0,49	50%	
Legende:					
GWP:	Treibhauspotential [kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
ODP:	Ozonabbaupotential [kg R <sub>11</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
AP:	Versauerungspotential [kg SO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
EP:	Eutrophierungspotential [kg PO <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
POCP:	Bodennahe Ozonbildung [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
PE n.e.:	nicht erneuerbare Primärenergie [MJ/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
LCC:	Lebenszykluskosten [€/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				

Tabelle F- 5: Nutzwertanalyse für die Varianten im Szenario 4 (Trendbruch)

Kriterium	Bewertungs- größe	normiert auf Referenzwert [-]	Einzel- nutzwert [-]	Gewich- tung	Gesamt- nutzwert [-]
1	2	3	4	5	6
Herkömmliche Tragstruktur: Szenario 4					
GWP	7,17	1,04	0,43	15%	0,38
ODP	2,74E-07	1,15	0,25	5%	
AP	0,0267	0,97	0,55	5%	
EP	0,00299	0,99	0,52	5%	
POCP	0,00200	0,99	0,52	5%	
PE n.e.	82,4	1,02	0,47	15%	
LCC	33,6	1,12	0,30	50%	
Flexible Tragstruktur (a): Szenario 4					
GWP	7,37	1,07	0,38	15%	0,34
ODP	2,99E-07	1,26	0,07	5%	
AP	0,0269	0,98	0,54	5%	
EP	0,00299	0,99	0,52	5%	
POCP	0,00201	0,99	0,51	5%	
PE n.e.	87,7	1,08	0,36	15%	
LCC	33,7	1,12	0,29	50%	
Flexible Tragstruktur (b): Szenario 4					
GWP	7,09	1,03	0,45	15%	0,37
ODP	2,92E-07	1,23	0,12	5%	
AP	0,0267	0,97	0,55	5%	
EP	0,00295	0,97	0,55	5%	
POCP	0,00200	0,99	0,52	5%	
PE n.e.	82,7	1,02	0,46	15%	
LCC	33,8	1,13	0,29	50%	
Legende:					
GWP:	Treibhauspotential [kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
ODP:	Ozonabbaupotential [kg R <sub>11</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
AP:	Versauerungspotential [kg SO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
EP:	Eutrophierungspotential [kg PO <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
POCP:	Bodennahe Ozonbildung [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
PE n.e.:	nicht erneuerbare Primärenergie [MJ/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
LCC:	Lebenszykluskosten [€/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				

## Anhang F - Nutzwertanalysen für das Beispielgebäude in allen Szenarien

Tabelle F- 6: Nutzwertanalyse für die Varianten im Szenario 5 (Verödenndes Quartier)

Kriterium	Bewertungs- größe	normiert auf Referenzwert [-]	Einzel- nutzwert [-]	Gewich- tung	Gesamt- nutzwert [-]
1	2	3	4	5	6
Herkömmliche Tragstruktur: Szenario 5					
GWP	8,64	1,26	0,07	15%	0,17
ODP	3,32E-07	1,39	0,00	5%	
AP	0,0305	1,10	0,33	5%	
EP	0,00356	1,17	0,21	5%	
POCP	0,00239	1,18	0,19	5%	
PE n.e.	94,7	1,17	0,22	15%	
LCC	35,8	1,19	0,18	50%	
Flexible Tragstruktur (a): Szenario 5					
GWP	9,72	1,41	0,00	15%	0,06
ODP	3,89E-07	1,63	0,00	5%	
AP	0,0322	1,17	0,22	5%	
EP	0,00382	1,26	0,07	5%	
POCP	0,00254	1,26	0,07	5%	
PE n.e.	115,5	1,43	0,00	15%	
LCC	37,4	1,25	0,09	50%	
Flexible Tragstruktur (b): Szenario 5					
GWP	8,80	1,28	0,03	15%	0,11
ODP	3,58E-07	1,50	0,00	5%	
AP	0,0311	1,13	0,29	5%	
EP	0,00364	1,20	0,16	5%	
POCP	0,00245	1,21	0,14	5%	
PE n.e.	99,5	1,23	0,12	15%	
LCC	36,8	1,23	0,12	50%	
Legende:					
GWP:	Treibhauspotential [kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
ODP:	Ozonabbaupotential [kg R <sub>11</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
AP:	Versauerungspotential [kg SO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
EP:	Eutrophierungspotential [kg PO <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
POCP:	Bodennahe Ozonbildung [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
PE n.e.:	nicht erneuerbare Primärenergie [MJ/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
LCC:	Lebenszykluskosten [€/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				

## Anhang F - Nutzwertanalysen für das Beispielgebäude in allen Szenarien

Tabelle F- 7: Nutzwertanalyse für die Varianten im Szenario 6 (Unstete Standortentwicklung)

Kriterium	Bewertungs- größe	normiert auf Referenzwert [-]	Einzel- nutzwert [-]	Gewich- tung	Gesamt- nutzwert [-]
1	2	3	4	5	6
Herkömmliche Tragstruktur: Szenario 6					
GWP	7,67	1,12	0,31	15%	0,33
ODP	2,80E-07	1,18	0,21	5%	
AP	0,0256	0,93	0,62	5%	
EP	0,00297	0,98	0,53	5%	
POCP	0,00208	1,03	0,45	5%	
PE n.e.	84,2	1,04	0,43	15%	
LCC	34,3	1,14	0,26	50%	
Flexible Tragstruktur (a): Szenario 6					
GWP	4,93	0,72	0,97	15%	0,68
ODP	1,97E-07	0,83	0,79	5%	
AP	0,0211	0,77	0,89	5%	
EP	0,00220	0,73	0,96	5%	
POCP	0,00149	0,74	0,94	5%	
PE n.e.	68,5	0,85	0,76	15%	
LCC	30,2	1,01	0,49	50%	
Flexible Tragstruktur (b): Szenario 6					
GWP	4,35	0,63	1,00	15%	0,75
ODP	1,77E-07	0,74	0,93	5%	
AP	0,0205	0,74	0,93	5%	
EP	0,00208	0,69	1,00	5%	
POCP	0,00143	0,71	0,99	5%	
PE n.e.	58,5	0,72	0,96	15%	
LCC	29,7	0,99	0,52	50%	
Legende:					
GWP:	Treibhauspotential [kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
ODP:	Ozonabbaupotential [kg R <sub>11</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
AP:	Versauerungspotential [kg SO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
EP:	Eutrophierungspotential [kg PO <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
POCP:	Bodennahe Ozonbildung [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
PE n.e.:	nicht erneuerbare Primärenergie [MJ/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				
LCC:	Lebenszykluskosten [€/m <sup>2</sup> <sub>BGFa</sub> ]				



## Anhang G Tabellen zu den Sensitivitätsanalysen für das Beispielgebäude

Tabelle G- 1: Entscheidungsmatrizen für unterschiedliche Wichtungen

Szenario Nr.	0	1	2	3	4	5	6
Variante							
<b>originale Wichtung</b>							
Herkömmliche Tragstruktur	0,50	0,80	0,63	0,59	0,38	0,17	0,33
Flexible Tragstruktur (a)	0,39	0,72	0,59	0,65	0,34	0,06	0,68
Flexible Tragstruktur (b)	0,49	0,80	0,68	0,72	0,37	0,11	0,75
<b>nur Ökonomie</b>							
Herkömmliche Tragstruktur	0,50	0,65	0,44	0,38	0,30	0,18	0,26
Flexible Tragstruktur (a)	0,43	0,59	0,45	0,46	0,29	0,09	0,49
Flexible Tragstruktur (b)	0,46	0,62	0,49	0,49	0,29	0,12	0,52
<b>nur Ökologie</b>							
Herkömmliche Tragstruktur	0,50	0,96	0,83	0,81	0,45	0,16	0,40
Flexible Tragstruktur (a)	0,35	0,85	0,73	0,85	0,39	0,04	0,88
Flexible Tragstruktur (b)	0,51	0,97	0,88	0,95	0,45	0,10	0,97
<b>vereinfachte Wichtung</b>							
Herkömmliche Tragstruktur	0,50	0,82	0,66	0,58	0,36	0,12	0,28
Flexible Tragstruktur (a)	0,40	0,75	0,63	0,71	0,34	0,04	0,73
Flexible Tragstruktur (b)	0,50	0,81	0,72	0,74	0,37	0,08	0,76

Tabelle G- 2: Entscheidungsregeln unter Ungewissheit für unterschiedliche Wichtungen

Entscheidungsregel	Maximin-Regel	Maximax-Regel	Hurwicz-Regel ( $\alpha = 0,5$ )	Savage-Niehans-Regel	Laplace-Regel
<div>Inhalt</div> <div>Variante</div>	Min(U)	Max(U)	$0,5 \cdot \text{Min}(U) + 0,5 \cdot \text{Max}(U)$	Max(R)	$\Sigma U$
<b>originale Wichtung</b>					
Herkömmliche Tragstruktur	0,17	0,80	0,49	0,42	3,41
Flexible Tragstruktur (a)	0,06	0,72	0,39	0,11	3,44
Flexible Tragstruktur (b)	0,11	0,80	0,46	0,06	3,92
<b>nur Ökonomie</b>					
Herkömmliche Tragstruktur	0,18	0,65	0,41	0,26	2,70
Flexible Tragstruktur (a)	0,09	0,59	0,34	0,09	2,81
Flexible Tragstruktur (b)	0,12	0,62	0,37	0,06	2,99
<b>nur Ökologie</b>					
Herkömmliche Tragstruktur	0,16	0,96	0,56	0,57	4,12
Flexible Tragstruktur (a)	0,04	0,88	0,46	0,17	4,07
Flexible Tragstruktur (b)	0,10	0,97	0,54	0,05	4,85
<b>vereinfachte Wichtung</b>					
Herkömmliche Tragstruktur	0,12	0,82	0,47	0,48	3,33
Flexible Tragstruktur (a)	0,04	0,75	0,39	0,10	3,59
Flexible Tragstruktur (b)	0,08	0,81	0,44	0,05	3,99

Tabelle G- 3: Entscheidungsregeln unter Unsicherheit für unterschiedliche Wichtungen

Entscheidungsregel	Bayes-Regel	Hodges-Lehman-Regel ( $\lambda = 0,2$ )	Hodges-Lehman-Regel ( $\lambda = 0,5$ )	Hodges-Lehman-Regel ( $\lambda = 0,8$ )
Inhalt	Gl. 3-10	Gl. 3-12	Gl. 3-12	Gl. 3-12
Variante				
<b>originale Wichtung</b>				
Herkömmliche Tragstruktur	0,47	0,23	0,32	0,41
Flexible Tragstruktur (a)	0,46	0,14	0,26	0,38
Flexible Tragstruktur (b)	0,53	0,20	0,32	0,45
<b>nur Ökonomie</b>				
Herkömmliche Tragstruktur	0,37	0,22	0,27	0,33
Flexible Tragstruktur (a)	0,38	0,15	0,23	0,32
Flexible Tragstruktur (b)	0,40	0,18	0,26	0,35
<b>nur Ökologie</b>				
Herkömmliche Tragstruktur	0,57	0,24	0,36	0,48
Flexible Tragstruktur (a)	0,54	0,14	0,29	0,44
Flexible Tragstruktur (b)	0,65	0,21	0,38	0,54
<b>vereinfachte Wichtung</b>				
Herkömmliche Tragstruktur	0,45	0,19	0,29	0,39
Flexible Tragstruktur (a)	0,48	0,13	0,26	0,39
Flexible Tragstruktur (b)	0,54	0,17	0,31	0,44





## **Dissertationsreihe**

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner  
Institut für Massivbau  
Technische Universität Darmstadt

- Heft 1: **Stefan Kempf (2001)**  
*Technische und wirtschaftliche Bewertung der Mindestbewehrungsregeln für Stahlbetonbauteile*
- Heft 2: **Katja Reiche (2001)**  
*Nachhaltigkeitsanalyse demontagegerechter Baukonstruktionen - Entwicklung eines Analysemodells für den Entwurf von Gebäuden*
- Heft 3: **Michael Six (2001)**  
*Sicherheitskonzept für nichtlineare Traglastverfahren im Betonbau*
- Heft 4: **Eric Simon (2002)**  
*Schubtragverhalten von Mauerwerk aus großformatigen Steinen*
- Heft 5: **Holger Schmidt (2003)**  
*Versagenswahrscheinlichkeit unbewehrter Wand-Decken-Verbindungen bei Gasexplosionen im Fertigteilbau*
- Heft 6: **Andreas Bachmann (2003)**  
*Ein wirklichkeitsnaher Ansatz der böenerregten Windlasten auf Hochhäuser in Frankfurt/Main*
- Heft 7: **Duy Tien Nguyen (2004)**  
*Rotationskapazität von biegebeanspruchten Stahlbetonbauteilen mit Schubrissbildung*
- Heft 8: **Gert Wolfgang Riegel (2004)**  
*Ein softwaregestütztes Berechnungsverfahren zur Prognose und Beurteilung der Nutzungskosten von Bürogebäuden*
- Heft 9: **Christian Glock (2004)**  
*Traglast unbewehrter Beton- und Mauerwerkswände - Nichtlineares Berechnungsmodell und konsistentes Bemessungskonzept für schlanke Wände unter Druckbeanspruchung*
- Heft 10: **Kati Herzog (2005)**  
*Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen - Entwicklung eines Modells und einer Softwarekomponente zur ökonomischen Analyse und Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden*

- Heft 11: **Andreas Garg (2006)**  
*Spannungszustände in Fahrbahnplatten weit gespannter Stahlverbundbrücken - Empfehlungen für die Herstellung der Ortbeton-Fahrbahnplatte von Talbrücken mit der Schalwagenmethode*
- Heft 12: **Tilo Proske (2007)**  
*Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton - Ein wirklichkeitsnahes Modell zur Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung*
- Heft 13: **Simon Glowienka (2007)**  
*Zuverlässigkeit von großformatigem Mauerwerk - Probabilistische Analyse von großformatigem Mauerwerk aus Kalksandstein und Porenbeton mit Dünnbettvermörtelung*
- Heft 14: **Alexander Renner (2007)**  
*Energie- und Ökoeffizienz von Wohngebäuden - Entwicklung eines Verfahrens zur lebenszyklusorientierten Bewertung der Umweltwirkungen unter besonderer Berücksichtigung der Nutzungsphase*
- Heft 15: **Guido Hausmann (2007)**  
*Verformungsvorhersage vorgespannter Flachdecken unter Berücksichtigung der stochastischen Eigenschaften*
- Heft 16: **Stefan Daus (2007)**  
*Zuverlässigkeit des Klebeverbundes von nachträglich verstärkten Betonbauteilen – Sicherheitskonzept für den Verbundnachweis von oberflächlich geklebter Bewehrung*
- Heft 17: **Thomas Kranzler (2008)**  
*Tragfähigkeit überwiegend horizontal beanspruchter Aussteifungsscheiben aus unbewehrtem Mauerwerk*
- Heft 18: **Lars Richter (2009)**  
*Tragfähigkeit nichttragender Wände aus Mauerwerk – Ein nichtlineares Berechnungsmodell und Bemessungsverfahren für biegebeanspruchte Innen- und Außenwände*
- Heft 19: **Markus Spengler (2010)**  
*Dynamik von Eisenbahnbrücken unter Hochgeschwindigkeitsverkehr Entwicklung eines Antwortspektrums zur Erfassung der dynamischen Tragwerksreaktion*
- Heft 20: **Linh Ngoc Tran (2011)**  
*Berechnungsmodell zur vereinfachten Abschätzung des Ermüdungsverhaltens von Federplatten bei Fertigträgerbrücken*

- Heft 21     **Carmen Schneider (2011)**  
*Steuerung der Nachhaltigkeit im Planungs- und Realisierungsprozess von Büro- und Verwaltungsgebäuden – Entwicklung eines Instrumentes zur Vorbewertung und Optimierung der Nachhaltigkeitsqualität*
- Heft 22     **Frank Ritter (2011)**  
*Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen – Modellierung und praxisnahe Prognose*
- Heft 23     **Benjamin von Wolf-Zdekauer (2011)**  
*Energieeffizienz von Anlagensystemen zur Gebäudekühlung. Ein nutzenbezogener Bewertungsansatz*
- Heft 24     **Eric Brehm (2011)**  
*Reliability of Unreinforced Masonry Bracing Walls – Probabilistic Approach and Optimized Target Values*
- Heft 25     **Carolin Roth (2011)**  
*Lebenszyklusanalyse von Baukonstruktionen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten – ein Beitrag zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Gebäuden bei ungewissem Lebensweg*